

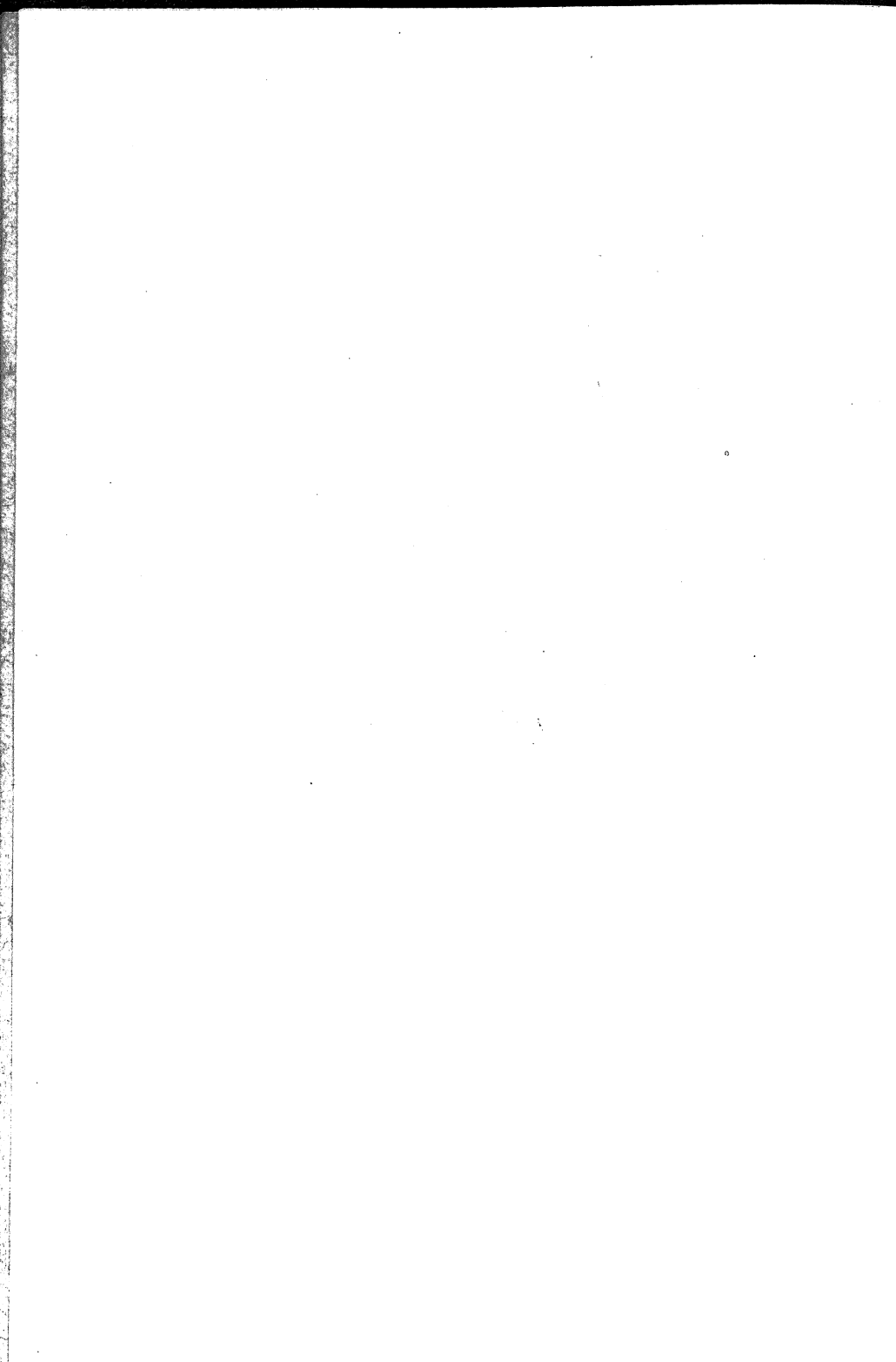


ENCYKLOPÄDIE
DER
MATHEMATISCHEN
WISSENSCHAFTEN

MIT EINSCHLUSS IHRER ANWENDUNGEN.

ERSTER BAND:
ARITHMETIK UND ALGEBRA.

7



ENCYKLOPÄDIE
DER
MATHEMATISCHEN
WISSENSCHAFTEN

MIT EINSCHLUSS IHRER ANWENDUNGEN.

HERAUSGEGEBEN
IM AUFTRAGE DER AKADEMIEEN DER WISSENSCHAFTEN
ZU GÖTTINGEN, LEIPZIG, MÜNCHEN UND WIEN,
SOWIE UNTER MITWIRKUNG ZAHLREICHER FACHGENOSSEN.

ERSTER BAND IN ZWEI TEILEN.

ARITHMETIK UND ALGEBRA.

REDIGIERT VON
WILHELM FRANZ MEYER
IN KÖNIGSBERG I. PR.

ERSTER TEIL.



LEIPZIG,
DRUCK UND VERLAG VON B. G. TEUBNER.

510.3

ES6

V.1

pr1

Einleitender Bericht über das Unternehmen der Herausgabe der Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften.

Im September des Jahres 1894 trafen auf einer Fahrt in den Harz *Felix Klein* und *Heinrich Weber* mit *Franz Meyer*, damals Professor an der Bergakademie in Clausthal, zusammen. Dort wurde der erste Plan der Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften entworfen. *Franz Meyer* entwickelte seinen Gedanken der Abfassung eines Wörterbuches der reinen und angewandten *Mathematik*.

Das zu Ende gehende Jahrhundert hat wie auf so vielen Gebieten menschlicher Erkenntnis so auch hier den Wunsch nach einer zusammenfassenden Darstellung der in seinem Laufe geleisteten wissenschaftlichen Arbeit entstehen lassen, welche zugleich die mannigfaltigen Anwendungen auf Naturwissenschaft und Technik mit einbegreifen sollte. Erschöpfend freilich im Sinne einer geschlossenen, in alle Einzelheiten des weitverzweigten Baues eingehenden, alle Wege nach historischer wie nach methodischer Richtung bezeichnenden Darlegung konnte, beim Mangel umfassender Vorarbeiten, ein solches Werk nicht geplant werden, wollte man anders nicht seine Durchführung gefährden. So war es zunächst die Absicht, nur das „Notwendigste“, die fundamentalen „Begriffe“ unseres mathematischen Wissens in Form eines *Lexikons* zusammenzustellen und zu charakterisieren.

„Es sollte“ — so führte *Franz Meyer* in einem ersten Entwurfe aus — „die Erklärung des unter ein vorliegendes Stichwort fallenden Begriffes in der Form, in welcher er zuerst aufgetreten ist, gegeben werden, nebst Angabe der litterarischen Quelle, soweit das möglich ist. War dabei hauptsächlich an die neueren Begriffe gedacht, so sollten immerhin auch die alten und sogar auch die veralteten Kunstausdrücke Erwähnung finden, um sie wie in einem Museum zu kon-

1894 '36 - Stecher - 8175.00 Vols 1 - 6 m.

folgen bis in die neueste Zeit. Fast jeder Begriff differenziert und spaltet sich mit der Zeit, nimmt verschiedene Nüancen und Modifikationen an, verzweigt sich je nach den Anwendungen, die man von ihm macht, vertieft und verallgemeinert sich. Entsprechende Umänderungen, Zusätze und Zusammensetzungen erfährt das bezügliche Kunstwort. Die wichtigsten Abschnitte bei dieser Laufbahn des Begriffes sollten wiederum mit Belegen versehen werden.“ So sollte die Entwicklungsgeschichte eines jeden einzelnen Begriffes an seinem Teile ein Bild der fortschreitenden Wissenschaft liefern.

Der Plan fand die volle Zustimmung von *Klein* und *Weber*.

Frische und Mut ihn auszuführen mochte bei der Wanderung durch Berg und Wald sich stärken. Ein grosses Ziel war vor Augen gerückt, wert die Kräfte dafür einzusetzen und die Schwierigkeiten zu bestehen, die der Weg dahin darbieten würde. Das Unternehmen überstieg die Kraft des Einzelnen, es sollte ein Gemeinsames unserer Deutschen Mathematiker werden, zu dem ein jeder nach seinem besonderen Arbeitsgebiete beizutragen hätte, an dem darüber hinaus, wo es die Entwicklung mit sich brachte, auch Forscher aus dem Ausland heranzuziehen waren.

Damals war eben das *Kartell Deutscher Akademicien* geschlossen, bestimmt grosse wissenschaftliche Unternehmungen in gemeinsamer Arbeit ins Werk zu setzen und zu fördern. Die hier gestellte Aufgabe erschien recht eigentlich als eine Aufgabe des Kartells. Durch die Akademicien sollte nicht nur finanzielle Unterstützung geboten, sondern auch in wissenschaftlicher Beziehung der Fortgang der nicht rasch sich vollziehenden Arbeit — man dachte damals an eine Durchführung in sechs bis sieben Jahren — gesichert werden.

Die *Deutsche Mathematiker-Vereinigung* aber sollte in erster Linie das Unternehmen zu dem ihrigen machen durch das Zusammenwirken ihrer Mitglieder. Für sie wurde der eben mit Erfolg begonnene Plan grosser eingehender wissenschaftlicher Referate über alle aktuellen Gebiete der Mathematik, die jeweils in den Jahresberichten niedergelegt werden sollten, ergänzt durch diese neue zusammenfassende Aufgabe, für die aus jenen zum Teile wenigstens die Vorarbeiten gezogen werden konnten. *)

*) Schon auf der ersten Versammlung der Deutschen Mathematiker-Vereinigung in Halle, Herbst 1891, hat *Ernst Mühlen* bei der Besprechung des Encyclopädieunternehmens

So stellte sich der Bedeutung und dem Bedürfnis zusammenfassender Darstellung des weitverzweigten Wissens die Notwendigkeit eines Zusammenschlusses ihrer Vertreter zu gemeinsamer Arbeit in natürlichem Entwicklungsgang zur Seite.

* * *

Auf der *Naturforscherversammlung in Wien* im September 1894 beschloss die deutsche Mathematiker-Vereinigung den Plan der Abfassung eines Wörterbuches der reinen und angewandten Mathematik aufzunehmen und beauftragte *Franz Meyer*, für denselben die wissenschaftliche und finanzielle Unterstützung der im Kartell vereinigten Akademien und gelehrten Gesellschaften zu *Göttingen, Leipzig, München* und *Wien* anzurufen.

Zu Anfang des Jahres 1895 wurde der erste Entwurf des Wörterbuches, verbunden mit einem vorläufigen Plan der Finanzierung (welcher mit Beiziehung der Firma B. G. Teubner in Leipzig aufgestellt war) den Akademien vorgelegt und erlangte die prinzipielle Zustimmung von Göttingen, München und Wien, während die Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig mangels verfügbarer Mittel sich genötigt sah, von der Beteiligung am Unternehmen vorerst noch abzusehen.

Von den gelehrten Gesellschaften wurden *F. Klein* (Göttingen), *W. v. Dyck* (München), *G. v. Escherich* (Wien) beauftragt, die Verhandlungen mit der Redaktion und mit einem ins Auge zu fassenden Verlage einzuleiten und einen genauen Plan des Unternehmens nach seiner wissenschaftlichen wie nach seiner finanziellen Seite zu entwerfen. Diese akademische Kommission trat weiterhin als eine ständige Einrichtung der Redaktion zur Seite. Sie verstärkte sich gleich zu Anfang noch durch *H. Weber* (Strassburg) als Vertreter der deutschen Mathematiker-Vereinigung und *L. Boltzmann* (Wien) als Beirat in wissenschaftlichen Fragen. Später traten dann noch *H. v. Seeliger* (München) sowie neuerdings der später noch zu nennende *O. Hölder* (Leipzig) hinzu.

In eingehenden Vorarbeiten, welche die Gliederung des Stoffes und seine Einordnung in grössere zusammenfassende wie in kleinere

nehmungen, welche geeignet sind, das Studium der Mathematik zu erleichtern“ (1. Jahresbericht der D. M.-V., S. 59) anlässlich der Darlegung des Entwurfes zu seinem (inzwischen erschienenen) mathematischen Vokabularium auf eine solche

Einzelartikel, sodann den in Aussicht zu nehmenden Umfang des ganzen Werkes zum Gegenstande hatten, verging der Sommer 1895. Die Entscheidung über die Durchführbarkeit des Unternehmens aber brachte eine Konferenz der Delegierten der Akademien mit *Franz Meyer* im September 1895 zu Leipzig, an der sich auch *A. Wangerin* an Stelle *H. Weber's*, sowie Verlagsbuchhändler *Alfred Ackermann-Teubner* beteiligte. Neben einem ersten Entwurf einer Stoffanordnung nach Stichworten lag dort das Manuskript von *Felix Müller's* schon oben genanntem Lexikon der mathematischen Terminologie vor — und da zeigte sich, dass für die hier in Aussicht genommenen Zwecke einer *Encyklopädie* an einer *alphabetischen* Anordnung nicht festgehalten werden könne. Wollte man, wie dies der eingangs bezeichnete ursprüngliche Plan gewesen war, die Darlegung des Inhaltes unseres heutigen mathematischen Wissens anknüpfen an die einzelnen Begriffe und Kunstwörter und ihre Umgestaltung, so würde schon die richtige, von unnötigem Ballast freie Auswahl der aufzunehmenden Stichwörter, um welche sich die gesamte Darlegung zu gruppieren hätte, ganz erhebliche Schwierigkeiten bieten. Gleichwohl würde eine solche Anordnung eine weitgehende Zersplitterung des Inhaltes zur Folge haben, während doch andererseits besonders in der Darstellung der Resultate und Methoden der Forschung Wiederholungen kaum zu vermeiden wären. Das Lexikon würde zudem einen völlig unhomogenen Charakter erhalten, weil neben zusammenhängenden Entwicklungen über einzelne Gebiete auch ganz kurze Abschnitte, blosse Worterklärungen, eine Unmenge von Rückverweisen eingefügt werden müssten.

So kam in Leipzig auf Antrag von *Dyck* der Beschluss zu Stande, die Idee eines eigentlichen *Lexikons* fallen zu lassen und an Stelle des *künstlichen* Systems einer alphabetischen das *natürliche* System einer rein sachlichen Anordnung und Darlegung der mathematischen Wissensgebiete zu setzen. Auch in einer solchen wird noch oft genug der mannigfache Zusammenhang der einzelnen Disziplinen zerschnitten, kann das gegenseitige Ineinandergreifen in sachlicher oder in methodischer Hinsicht nur teilweise zum Ausdruck kommen, muss das Nacheinander der Darlegung das Nebeneinander der Thatsachen unvollkommen ersetzen. Aber doch ist es möglich, in der einfach ausgebreiteten Darstellung dem Hauptzuge der leitenden Gedanken zu folgen und ihm die Entwicklung der Einzelgebiete mit ihrer weiteren

Unter Zugrundelegung dieses neuen Prinzipes wurde nun zunächst die Disposition für die der reinen Mathematik gewidmeten Bände getroffen. Für ihre Ausarbeitung wie für die Bearbeitung zweier Probeartikel über „Flächen dritter Ordnung“ und über „Potentialtheorie“ gelang es neben *Franz Meyer* noch *Heinrich Burkhardt*, damals Privatdozent an der Universität Göttingen, zu gewinnen und den letzten auch zum Eintritt in die Redaktion zu bestimmen, denn von vornherein trat zu Tage, dass die Aufgabe der Redaktion von einem Einzelnen nicht würde bewältigt werden können. Im besonderen übernahm dann späterhin *Franz Meyer* die Redaktion von Band I (Arithmetik und Algebra) und von Band III (Geometrie), *Heinrich Burkhardt* die des Bandes II (Analysis).

Es lässt sich nicht verkennen, dass mit der Änderung des Systems der Darlegung auch eine Verschiebung des Inhaltes oder doch eine andere Betonung desselben gegeben war. Nicht der einzelne Begriff, sondern der Aufbau des Inhaltes in den Resultaten und Methoden der mathematischen Forschung bildet das Prinzip der Gruppierung. So wurde als Aufgabe der „*Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*“, wie das Werk von da ab genannt wurde, die folgende aufgestellt:

„Aufgabe der Encyklopädie soll es sein, in knapper, zu rascher Orientierung geeigneter Form, aber mit möglichster Vollständigkeit eine Gesamtdarstellung der mathematischen Wissenschaften nach ihrem gegenwärtigen Inhalt an gesicherten **Resultaten** zu geben und zugleich durch sorgfältige Litteraturangaben die geschichtliche Entwicklung der mathematischen **Methoden** seit dem Beginn des 19. Jahrhunderts nachzuweisen. Sie soll sich dabei nicht auf die sogenannte reine Mathematik beschränken, sondern auch die **Anwendungen** auf Mechanik und Physik, Astronomie und Geodäsie, die verschiedenen Zweige der Technik und andere Gebiete mit berücksichtigen und dadurch ein Gesamtbild der Stellung geben, die die Mathematik innerhalb der heutigen Kultur einnimmt.“

Eine weitere Schwierigkeit lag nunmehr in der Bemessung des Umfanges des ganzen Werkes und in einer richtigen Verteilung des Raumes auf die einzelnen Gebiete. Vergleiche mit früheren Werken ähnlicher Art, mit analogen anderer Disziplinen boten nur geringen

Einzelartikel, sodann den in Aussicht zu nehmenden Umfang des ganzen Werkes zum Gegenstande hatten, verging der Sommer 1895. Die Entscheidung über die Durchführbarkeit des Unternehmens aber brachte eine Konferenz der Delegierten der Akademien mit *Franz Meyer* im September 1895 zu Leipzig, an der sich auch *A. Wangerin* an Stelle *H. Weber's*, sowie Verlagsbuchhändler *Alfred Ackermann-Teubner* beteiligte. Neben einem ersten Entwurf einer Stoffanordnung nach Stichworten lag dort das Manuskript von *Felix Müller's* schon oben genanntem Lexikon der mathematischen Terminologie vor — und da zeigte sich, dass für die hier in Aussicht genommenen Zwecke einer *Encyklopädie* an einer *alphabetischen* Anordnung nicht festgehalten werden könne. Wollte man, wie dies der eingangs bezeichnete ursprüngliche Plan gewesen war, die Darlegung des Inhaltes unseres heutigen mathematischen Wissens anknüpfen an die einzelnen Begriffe und Kunstwörter und ihre Umgestaltung, so würde schon die richtige, von unnötigem Ballast freie Auswahl der aufzunehmenden Stichwörter, um welche sich die gesamte Darlegung zu gruppieren hätte, ganz erhebliche Schwierigkeiten bieten. Gleichwohl würde eine solche Anordnung eine weitgehende Zersplitterung des Inhaltes zur Folge haben, während doch andererseits besonders in der Darstellung der Resultate und Methoden der Forschung Wiederholungen kaum zu vermeiden wären. Das Lexikon würde zudem einen völlig unhomogenen Charakter erhalten, weil neben zusammenhängenden Entwicklungen über einzelne Gebiete auch ganz kurze Abschnitte, blosser Worterklärungen, eine Unmenge von Rückverweisen eingefügt werden müssten.

So kam in Leipzig auf Antrag von *Dyck* der Beschluss zu Stande, die Idee eines eigentlichen *Lexikons* fallen zu lassen und an Stelle des *künstlichen* Systems einer alphabetischen das *natürliche* System einer rein sachlichen Anordnung und Darlegung der mathematischen Wissensgebiete zu setzen. Auch in einer solchen wird noch oft genug der mannigfache Zusammenhang der einzelnen Disziplinen zerschnitten, kann das gegenseitige Ineinandergreifen in sachlicher oder in methodischer Hinsicht nur teilweise zum Ausdruck kommen, muss das Nacheinander der Darlegung das Nebeneinander der Thatsachen unvollkommen ersetzen. Aber doch ist es möglich, in der einfach ausgebreiteten Darstellung dem Hauptzuge der leitenden Gedanken zu folgen und ihm die Entwicklung der Einzelgebiete mit ihrer weiteren Ausgestaltung einzufügen.

Unter Zugrundelegung dieses neuen Prinzipes wurde nun zunächst die Disposition für die der reinen Mathematik gewidmeten Bände getroffen. Für ihre Ausarbeitung wie für die Bearbeitung zweier Probeartikel über „Flächen dritter Ordnung“ und über „Potentialtheorie“ gelang es neben *Franz Meyer* noch *Heinrich Burkhardt*, damals Privatdozent an der Universität Göttingen, zu gewinnen und den letzten auch zum Eintritt in die Redaktion zu bestimmen, denn von vornherein trat zu Tage, dass die Aufgabe der Redaktion von einem Einzelnen nicht würde bewältigt werden können. Im besonderen übernahm dann späterhin *Franz Meyer* die Redaktion von Band I (Arithmetik und Algebra) und von Band III (Geometrie), *Heinrich Burkhardt* die des Bandes II (Analysis).

Es lässt sich nicht verkennen, dass mit der Änderung des Systems der Darlegung auch eine Verschiebung des Inhaltes oder doch eine andere Betonung desselben gegeben war. Nicht der einzelne Begriff, sondern der Aufbau des Inhaltes in den Resultaten und Methoden der mathematischen Forschung bildet das Prinzip der Gruppierung. So wurde als Aufgabe der „*Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*“, wie das Werk von da ab genannt wurde, die folgende aufgestellt:

„Aufgabe der Encyklopädie soll es sein, in knapper, zu rascher Orientierung geeigneter Form, aber mit möglichster Vollständigkeit eine Gesamtdarstellung der mathematischen Wissenschaften nach ihrem gegenwärtigen Inhalt an gesicherten Resultaten zu geben und zugleich durch sorgfältige Litteraturangaben die geschichtliche Entwicklung der mathematischen Methoden seit dem Beginn des 19. Jahrhunderts nachzuweisen. Sie soll sich dabei nicht auf die sogenannte reine Mathematik beschränken, sondern auch die Anwendungen auf Mechanik und Physik, Astronomie und Geodäsie, die verschiedenen Zweige der Technik und andere Gebiete mit berücksichtigen und dadurch ein Gesamtbild der Stellung geben, die die Mathematik innerhalb der heutigen Kultur einnimmt.“

Eine weitere Schwierigkeit lag nunmehr in der Bemessung des Umfanges des ganzen Werkes und in einer richtigen Verteilung des Raumes auf die einzelnen Gebiete. Vergleiche mit früheren Werken ähnlicher Art, mit analogen anderer Disziplinen boten nur geringen

Anhalt. Hier konnte ein erster Ansatz nur als eine wünschenswerte Begrenzung, nicht als eine sichere Norm aufgestellt werden, immerhin aber musste ein solcher Überschlag die Grundlage für die Bemessung der von den Akademien beizusteuern den Mittel wie für die Verhandlungen mit der Verlagsbuchhandlung bilden.

Man einigte sich, sechs Bände Grossoktav zu je vierzig Bogen als Ausgangspunkt für die Raumdistribution festzulegen. Drei Bände sollten der reinen, zwei der angewandten Mathematik dienen, ein weiterer den historischen, philosophischen und didaktischen Fragen gewidmet sein. Jeder Band sollte mit einem eigenen Register versehen werden. Der letzte Band sollte ausserdem eine zusammenfassende Gesamtübersicht, und, um das Werk auch als Nachschlagewerk brauchbar zu machen, ein ausführliches alphabetisch geordnetes *Register* enthalten.

Für die gesamte Durchführung des Unternehmens sollte die Redaktion mit der von den Akademien eingesetzten Kommission zusammenwirken:

Der *Redaktion* fiel die Aufgabe zu, auf Grund der in gemeinsamen Beratungen mit der Kommission festgestellten Disposition des Werkes den Stoff im einzelnen zu gliedern: die Mitarbeiter zu gewinnen, sich über die Verteilung der Gebiete mit ihnen zu verständigen und die gegenseitige Bezugnahme der Referenten über benachbarte Gebiete zu vermitteln; für die Erzielung eines einheitlichen Charakters der verschiedenen Artikel Sorge zu tragen; die Drucklegung zu überwachen; die Register zusammenzustellen; endlich durch die Kommission regelmässige Berichte über den Fortgang des Werkes an die beteiligten Akademien zu erstatten.

Der *akademischen Kommission* sollte die Wahrnehmung des besonderen Interesses der Akademien an dem Gedeihen des Werkes und die thatkräftige wissenschaftliche Unterstützung der Redaktion obliegen. Insbesondere sollte die Zustimmung dieser Kommission erforderlich sein für alle etwa sich als notwendig erweisenden Änderungen im Plane des Werkes wie in der Zusammensetzung der Redaktion und ebenso für die Auswahl der Mitarbeiter.

* * *

Im Frühjahr 1896 erhielten die vorgelegten Pläne und Organisationsvorschläge der Kommission und Redaktion die Zustimmung der Aka-

demieen zu *Göttingen*, *München* und *Wien* und wurde der Vertrag für die Herausgabe mit dem Verlage von *B. G. Teubner* in Leipzig abgeschlossen.

Und nun begann das Werk — unter günstigen Auspicien, denn gleich von Anfang an gelang es der Redaktion, einen grossen, bedeutenden Kreis von Mitarbeitern sich zu sichern, bereit unter Hintersetzung ihrer besonderen Interessen ihre Arbeit in den Dienst der gemeinsamen Sache zu stellen. Es waren „*Allgemeine Grundsätze*“ ausgegeben worden, welche nach Möglichkeit eine gemeinsame Basis des Aufbaues der Artikel und eine gleichmässige Behandlung des Stoffes sichern sollten, ohne doch die wissenschaftliche Freiheit und die Individualität des Einzelnen, der für seine Darlegung die volle Verantwortlichkeit trägt, allzusehr zu beschränken.*)

Über die Anordnung der einzelnen Bände, wie sie nunmehr, gestützt auf diese Grundlagen allmählich sich gestaltete, wird in den besonderen Einleitungen der Redaktion zu berichten sein. Hier soll nur hervorgehoben werden, wie die Aufstellung und allmähliche Ergänzung der umfassenden Disposition, die gegenseitige Abgleichung des Inhaltes der einzelnen Aufsätze und die Klarlegung ihrer wechselseitigen Beziehungen ganz besonders gefördert wurde in den häufigen persönlichen Konferenzen der Mitarbeiter, der Redakteure und Commissionsmitglieder untereinander. Sie bedeuten ein aufs dankbarste anzuerkennendes Opfer aller Beteiligten, aber auch einen bleibenden

*) Wir glauben, sie an dieser Stelle mit denjenigen Abänderungen und Eränzungen wiedergeben zu sollen, welche sie später, insbesondere bei Inangriffnahme der Bände der angewandten Mathematik, erfahren haben.

Allgemeine Grundsätze für die Bearbeitung der Artikel.

1. Innerhalb des einzelnen Artikels werden die dem betreffenden Gebiete eigenthümlichen mathematischen *Begriffe*, ihre wichtigsten *Eigenschaften*, die fundamentalsten *Sätze*, und die *Untersuchungsmethoden*, die sich als fruchtbar erwiesen haben, dargestellt.

2. Auf die Anführung von *Beweisen* der mitgetheilten Sätze muss verzichtet werden; nur wenn sich um prinzipiell wichtige Beweismethoden handelt, kann eine solche Andeutung der selben gegeben werden.

3. Die auf *Anwendungen* bezüglichen Theile des Werkes sollen einen doppelten Zweck erfüllen: sie sollen *einerseits* den Mathematiker darüber orientieren, welche Fragen die Anwendungen an ihn stellen, *andererseits* den Astronomen, Physiker, Techniker darüber, welche Antwort die Mathematik auf diese Fragen giebt. Demgemäss beschränken sie sich auf die mathematische Seite der Anwendungen; Instrumentenkunde, Beobachtungskunst, Sammlung von Konstanten, Verwaltungsvorschriften fallen ausserhalb des Rahmens des Werkes.

Gewinn für das ganze Werk wie für Alle, die an demselben sich bethätigt haben. Die Naturforscherversammlungen des letzten Jahrzehntes, von der Wiener Versammlung des Jahres 1894, auf welcher der Grundstein des Werkes gelegt wurde, angefangen, der internationale Mathematikerkongress in Zürich (1897), wie endlich besondere Konferenzen der akademischen Kommission und der Redaktion, die fast regelmässig mit den jährlichen Versammlungen des Kartells der deutschen Akademien vereinigt wurden, boten die wichtige Gelegenheit zur gemeinsamen Beratung über den Fortgang des Werkes und zum Gedankenaustausch über seine Ausgestaltung im Einzelnen.

Ganz besonders trat die Notwendigkeit persönlicher Aussprache hervor, als es sich, nachdem die wesentlichsten Schritte für die Disposition und die Durchführung der drei ersten Bände der reinen Mathematik getan waren, im Jahre 1897 darum handelte, nunmehr auch an die der angewandten Mathematik gewidmeten Bände heranzutreten. Von vorneherein war klar geworden, dass nur eine Erweiterung der Redaktion die Durchführung des Unternehmens sichern konnte und ebenso, dass es — wollte man nicht die Fertigstellung

Soll das erste dieser Ziele erreicht werden, so wird erforderlich sein, kurze Angabe der Überlegungen, die zur mathematischen Formulierung des betr. Problems geführt haben; explizite Aufstellung dieser Formulierung; Angabe der Grenzen, innerhalb deren in den Fällen der Praxis die auftretenden Konstanten liegen; Angabe des Genauigkeitsgrades, bis zu dem die betr. Formulierung als richtig anzusehen ist.

Soll auch das zweite Ziel erreicht werden, so wird man sich nicht auf blossе Verweisungen auf diejenigen Stellen der drei ersten Bände beschränken dürfen, an denen das betr. Problem behandelt ist; man wird das Resultat der erforderlichen mathematischen Operationen (Gleichungsauflösung, geometrische Konstruktion, Integration) kurz angeben müssen. Dagegen ist Wiederholung der Litteraturangaben nicht erforderlich.

4. Streng chronologische Anordnung des Stoffes würde zu vielen Wiederholungen nötigen, für die nicht Raum ist; aber die *allmähliche Entwicklung der Begriffe und Methoden* wird an geeigneten Stellen auseinanderzusetzen und durch *genaue Litteraturangaben* zu belegen sein.

5. Die vorhandenen historischen Monographien und bibliographischen Hilfsmittel werden den Herren Mitarbeitern zur ersten Orientierung gute Dienste leisten; der erste Grundsatz aller historischen Kritik verlangt jedoch, dass die Darstellung schliesslich auf *eigenem Studium der Originalarbeiten* beruht.

6. Von *älteren Entwicklungsperioden* werden zwar die Resultate aufzunehmen sein, aber auf speziellen Nachweis ihres Ursprungs wird verzichtet werden müssen; andernfalls würde die Befolgung der Grundsatzes (5) den Abschluss der Arbeit über die Maassen verzögern, da es an den erforderlichen orientierenden Vorarbeiten namentlich für das 18. und teilweise auch für das 17. Jahrhundert noch

des Ganzen in weiteste Ferne verschieben — notwendig war, das Werk von allen Seiten in Angriff zu nehmen. Die akademische Kommission hoffte, *F. Klein* zum Eintritt in die Redaktion und speziell für die Bearbeitung des auf Mechanik bezüglichen Bandes bestimmen zu können und ebenso *A. Sommerfeld* (damals Privatdozent in Göttingen), für die Redaktion des mathematisch-physikalischen Teiles zu gewinnen. Zunächst übernahm es *Klein* auf mehrfachen grösseren Reisen (nach England, Frankreich, Holland, Italien und Österreich), zu denen die Akademien die nötigen Mittel in liberaler Weise gewährt hatten, für Disposition, Ausgestaltung und Mitarbeit an diesen Bänden die nötigen Vorarbeiten zu treffen. War schon für die ersten Bände die Beteiligung auch nichtdeutscher Autoren von wesentlicher Bedeutung für das Gepräge der Referate geworden, hier, bei den der angewandten Mathematik gewidmeten Bänden ist es besonders wichtig, der Entwicklung der einzelnen Gebiete gemäss auch auf die Mitarbeit nichtdeutscher Autoren zählen zu können.

So sehr wir das ganze Unternehmen nach Grundlage und Durchführung als ein deutsches in Anspruch nehmen wollen, es ist von

teilt. Demgemäss wird die historische Darstellung im allgemeinen zweckmässigerweise mit dem Beginn des neunzehnten Jahrhunderts einsetzen. Soweit überhaupt Zitate auf frühere Zeiten gegeben werden, werden sie in dem Sinne zu verstehen sein, dass keine Gewähr dafür geleistet wird, ob nicht eine noch frühere Stelle hätte zitiert werden können.

7. Die einzelnen mathematischen Fächer werden nicht als von einander isoliert betrachtet; es ist im Gegenteil eine der Hauptaufgaben des Werkes, das vielfache *In- und Ueberschnündergreifen der verschiedensten Gebiete* allgemein zum Bewusstsein zu bringen.

8. Einseitige Hervorhebung eines bestimmten Schulstandpunktes läuft dem Zwecke des Werkes zuwider. Das Erstrebenswerteste würde es sein, wenn es überall gelänge, die auf verschiedenen Wegen gewonnenen Resultate zu einer *objektiven Darstellung* ineinander zu arbeiten; wo das undurchführbar erscheint, soll wenigstens jede der einander gegenüberstehenden Auffassungen zu Worte kommen.

9. Zur Entscheidung schwebender *Streitfragen*, insbesondere solcher über Priorität, ist die Encyclopädie nicht berufen.

10. Werden in einem Gebiete Begriffe oder Sätze benutzt, die einem andern angehören, so wird auf den das letztere Gebiet behandelnden Abschnitt *einfach verweisen* (unter Benutzung der in der Disposition gebrauchten Signatur), auch wenn derselbe in der Encyclopädie erst an einer späteren Stelle erscheint. Übrigens werden Dinge, von welchen man zweifeln kann, ob sie in einen früheren oder in einen späteren Abschnitt gehören, im allgemeinen an der früheren Stelle eingereiht.

11. Soweit es ohne Beeinträchtigung der Grundsätze (7) und (10) geschehen kann, werden die Ansprüche an die *Vorkenntnisse* der Leser so gehalten, dass

höchster Bedeutung, soll es nicht einen einseitigen Standpunkt vertreten, dass in der Auffassung und Darlegung der einzelnen Gebiete alle Stimmen zu Worte kommen, welche zu der Eigenart ihrer Entwicklung beigetragen haben. Der bleibende Besitzstand einer jeden Wissenschaft ist ein internationales Gut, gewonnen aus der gesamten Arbeit der Gelehrten aller Zeiten und aller Länder. Aber in verschiedenen Richtungen, mit verschiedener Betonung und Wertschätzung der einzelnen Gebiete, mit charakteristischem Unterschied in den Methoden und in der Darstellungsform haben die verschiedenen Nationen, die verschiedenen Epochen sich an dieser Arbeit beteiligt. Dies muss in der Encyklopädie in der Darlegung des Inhaltes nach seiner geschichtlichen Entwicklung wie in der Heranziehung der Mitarbeiter zum Ausdruck gebracht werden. In der That zählt das Unternehmen heute neben dem Grundstock seiner deutschen Autoren Gelehrte Amerikas, Belgiens, Englands, Frankreichs, Hollands, Italiens, aus Norwegen, Österreich, Russland, Schweden zu seinen Mitarbeitern.

In den Jahren 1898 und 1899 konnte, besonders durch die persönlichen Bemühungen und Beziehungen *F. Klein's*, die Durchführung

das Werk auch demjenigen nützlich sein kann, der nur über ein bestimmtes Gebiet Orientierung sucht.

12. Bibliographische Vollständigkeit der *Litteraturangaben* ist ebensowenig möglich oder auch nur wünschenswert, als erschöpfende Aufzählung aller überhaupt aufgestellten Sätze oder vorgeschlagenen Kunstausdrücke.

13. Doch sollen alle wichtigen wirklich im Gebrauche befindlichen *termini technici* vorkommen und Erläuterung finden, damit sie später in das Register aufgenommen werden können. Besonders werden Fälle zu notieren sein, in welchen derselbe Terminus oder dasselbe Symbol von verschiedenen Autoren in verschiedenen Bedeutungen gebraucht wird, namentlich solche, in welchen der Sinn eines Terminis sich im Laufe der Zeit unvermerkt erweitert hat. Unter veralteten Terminis wird sparsame Auswahl zu treffen sein.

14. Überall, wo es zum Verständnis erforderlich ist, werden *Figuren im Texte* beigegeben.

15. Zur Aufnahme ausführlicher *Sammlungen von Formeln*, sowie von dergleichen *Tabellen numerischer Werte* der behandelten Funktionen — die doch nicht ohne vorherige Kontrolle aus anderen Werken abgeschrieben werden dürften — hat das Unternehmen *nicht* die Mittel. Dagegen sind Angaben darüber wünschenswert, wo dergleichen zu finden, erforderlichenfalls mit einer Warnung vor kritikloser Benutzung. — Ganz kleine Tabellen können Platz finden, welche den Verlauf einer Funktion durch einige wenige geeignet ausgewählte Zahlwerte veranschaulichen; vielfach wird eine graphische Darstellung denselben Dienst noch besser thun.

16. *Zitate* auf vielbenutzte Zeitschriften werden in einheitlicher abgekürzter

der der angewandten Mathematik gewidmeten Bände gesichert und eine erste Disposition derselben entworfen werden. Dabei erwies es sich als notwendig, den gesamten überreichen Stoff der Anwendungen statt wie geplant auf zwei, auf drei Bände zu verteilen, von denen der vierte die Mechanik, der fünfte die mathematische Physik, der sechste die Geodäsie, Geophysik und Astronomie umfassen sollte, während für die historischen, philosophischen und didaktischen Fragen ein siebenter Band vorbehalten wurde.

Im Jahre 1899 übernahm *Klein* definitiv die Redaktion des der Mechanik gewidmeten Bandes, bald darauf *Sommerfeld* die Redaktion des fünften Bandes, der mathematischen Physik.

An eine Disposition des sechsten Bandes konnte erst nach mannigfachen Vorverhandlungen im Jahre 1900 gegangen werden. Sie wurde von *E. Wiechert* in Göttingen für Geodäsie und Geophysik, von *R. Lehmann-Fillée* in Berlin für die Astronomie getroffen, die beide damit in die Redaktion der Encyclopädie eintraten. Leider sah sich der letztgenannte schon im Jahre 1902 genötigt, von der Redaktion, in der er in dankenswertester Weise die ersten Verhandlungen mit den gewählten Mitarbeitern geführt hatte, zurückzutreten. An seine

Form nach einem besonders aufgestellten Schema) gegeben; Bücher werden, wo sie in einem Artikel zum ersten Mal vorkommen, mit Familien- und abgekürztem Vornamen des Verfassers, Hauptteil des Titels, Ort und Jahr zitiert, bei öfterem Vorkommen die späteren Male in kürzerer Form. Wo zu genaueren Angaben die Sache nicht wichtig genug erscheint, haben blosse Aufzählungen von Autorennamen für den Leser meist wenig Nutzen.

17. In ihrer Allgemeinheit nichtssagende *epitheta ornantia*, wie epochemachend, genial, grossartig, klassisch u. s. w. werden zu vermeiden sein. Dagegen wird angegeben, in welcher Richtung jedesmal der Fortschritt liegt: ob in Aufindung *neuer Resultate* oder in *strenger Begründung* vorher nur vermutungsweise aufgestellter oder ungenügend bewiesener Sätze — oder in Abklärung umständlicher Entwicklungen durch Beiziehung *neuer Hilfsmittel* — oder endlich in *systematischer Anordnung* einer ganzen Theorie.

Speziell der Bearbeitung der Bände für angewandte Mathematik gelten noch die folgenden Bemerkungen:

1. Da sich die Encyclopädie wesentlich an ein mathematisches Publikum wendet, muss sie den Nachdruck auf die *mathematische* Seite der Theorien legen. Hierzu wird einerseits zu zählen sein die mathematische *Formulierung* der in Betracht kommenden Aufgaben, andererseits ihre *mathematische Durchführung*. Der letztere Gesichtspunkt, welcher in den spezifisch physikalischen und ingenieurwissenschaftlichen Büchern vielfach zurücktritt, wird hier wesentlich im Auge zu behalten sein. Andererseits wird aber auch im Gegensatz zu der Darstellung in der Mehrzahl der mathematischen Werke die experimentelle Grundlegung der Einzel-

Stelle trat mit dem Jahre 1903 *K. Schwarzschild*, der eben an die Göttinger Sternwarte berufen worden war.

Ostern 1904 wurde *Conrad H. Müller*, der schon längere Zeit an den Arbeiten der Redaktion beteiligt war, zur Unterstützung *F. Klein's* als Mitredakteur des vierten Bandes durch die akademische Kommission bestimmt; im Juli 1904 endlich *Ph. Furtwängler* (in Potsdam) zur Redaktion des ersten Teiles von Band VI (Geodäsie und Geophysik) in Gemeinschaft mit *E. Wiechert* berufen.

* * *

Inzwischen war, am 7. November 1898, das erste Heft des ersten Bandes zur Ausgabe gelangt, enthaltend *H. Schubert's* Bericht über die Grundlagen der Arithmetik, *E. Netto's* Referat über Kombinatorik und die grosse Arbeit von *A. Pringsheim* über Irrationalzahlen und Konvergenz unendlicher Prozesse. Im August 1899 begann dann die Publikation des zweiten Bandes mit *Pringsheim's* Grundlagen der allgemeinen Funktionenlehre, dem sich der Aufsatz von *A. Voss* über Differential- und

gebiete zu schildern sein, nämlich so weit, dass der Leser ein allgemeines Urteil über die Begründung und die Genauigkeitsgrenze der mathematischen Theorie gewinnt.

2. Dem allgemeinen Plane der Encyclopädie entspricht, wie in dem Rundschreiben hervorgehoben, die *historische Anordnung des Stoffes* und die Wiedergabe der Hauptmomente der *geschichtlichen Entwicklung*. Indess ist für die vorliegenden Bände in dieser Hinsicht zu beachten, dass die Ergebnisse der angewandten Mathematik rascher veralten, wie die der reinen, und dass daher die geschichtliche Entwicklung hier nicht dieselbe Wichtigkeit für das Verständnis des heutigen Standes der Theorie hat, wie dort. Trotzdem wird im Allgemeinen die historische Darstellung auch in den folgenden Bänden wünschenswert sein, soweit sie sich mit Systematik und Übersichtlichkeit verträgt.

3. Auf den Gebieten der angewandten Mathematik ist die Litteratur vielfach sehr zerstreut und unzusammenhängend. Die Redaktion hat es sich daher angelegen sein lassen, im voraus nach möglichst vielen Seiten, bei Mathematikern, Physikern, Technikern, . . . Astronomen, sowie in verschiedenen Ländern, Beziehungen anzubahnen; sie wird gerne bereit sein, den Herren Mitarbeitern auf Grund dieser Beziehungen sonst schwer beschaffbare Litteratur mitzutheilen oder wenigstens nachzuweisen.

4. Schliesslich scheint es nicht erforderlich, dass jeder Artikel von einem einzelnen Autor bearbeitet wird. Vielmehr sind auch *kleine Beiträge*, welche nur einen Teil des in dem betr. Artikel zu behandelnden Stoffes decken, unter Umständen erwünscht. Solche Beiträge können dem zusammenfassenden Artikel als Anhang beige gedruckt oder, falls sich der Verfasser damit einverstanden erklärt, dem Hauptreferenten des Gebietes zur Verfügung gestellt und von diesem eingearbeitet werden. In der Überschrift des Artikels wird die Autorenschaft solcher Beiträge in geeigneter Weise zum Ausdruck kommen.

Integralrechnung, sowie der des verstorbenen *G. Brunel* über bestimmte Integrale anreichte. Im Oktober 1902 erschien das erste Heft des dritten Bandes mit den Aufsätzen von *H. v. Mangoldt* und *R. v. Lilienthal* über Differentialgeometrie. Die Veröffentlichung der der angewandten Mathematik gewidmeten Teile setzte im Juni 1901 mit dem vierten Bande mit *M. Abraham's* Darlegung der geometrischen Grundbegriffe zur Mechanik der deformierbaren Körper und zwei Abhandlungen von *A. E. H. Love* über Hydrodynamik ein. Ostern 1903 folgte Band V (Mathematische Physik), eingeleitet durch die Aufsätze *C. Runge's* über Mass und Messen und *J. Zenneck's* über Gravitation, an welche sich *G. H. Bryan's* Allgemeine Grundlegung der Thermodynamik anschliesst. Noch im Laufe dieses Jahres wird mit der Herausgabe der ersten Hefte der beiden Teile des sechsten Bandes begonnen werden. Sie werden einerseits die Aufsätze von *C. Reinhardt* und *P. Pizetti* über Geodäsie, von *S. Finsterwalder* über Photogrammetrie enthalten, andererseits (im astronomischen Teil) die Abhandlungen von *E. Anding* und *F. Cohn* zur Theorie der Koordinaten bringen.

Man hat nicht überall diese, an allen Seiten des Werkes einsetzende Thätigkeit gutgeheissen in der Befürchtung, es möchte dadurch die Fertigstellung der einzelnen Bände sich allzusehr verzögern. Auch erhält der Leser gegenwärtig ein nicht leicht zu übersehendes Stückwerk vereinzelter Hefte, welches auch die Bibliotheken nur ungerne der Benützung freigeben. Es muss aber hierzu gesagt werden, dass eine Verzögerung der Herausgabe durch den breiten Umfang der redaktionellen Thätigkeit nicht eintritt, weil es sich fast durchweg um verschiedene Redakteure und Mitarbeiter handelt; im Gegenteil ist aber der gleichmässige Fortschritt des Ganzen für die Verwertung der wechselseitigen Beziehungen der einzelnen Bände und der einzelnen Aufsätze untereinander von wesentlicher Bedeutung. Der Erleichterung in der Benutzung der einzelnen Hefte andererseits hat die Verlags-handlung in jüngster Zeit durch eine besondere Ausstattung und Broschierung der Hefte Rechnung getragen.

Hier ist der Ort gegeben, das überaus grosse Entgegenkommen der Verlagsbuchhandlung *B. G. Teubner* mit besonderem Danke hervorzuheben. Einerseits hat die Firma alle auf die Drucklegung bezüglichen weitgehenden Wünsche und Anforderungen der Redaktion wie der Autoren auf das Bereitwilligste erfüllt und andererseits durch ihr eigenes Eintreten für die aufzuwendenden Honorare es ermöglicht,

dem im Laufe der Entwicklung immer stärker auftretenden Bedürfnis gerecht zu werden, das Werk in einem gegenüber dem ersten Plane ganz beträchtlich erweiterten Umfange durchzuführen.

Man mag bedauern, dass der ursprüngliche Ansatz, einen ganz gedrängten Überblick unseres heutigen mathematischen Wissens in sechs nicht unhandlichen Bänden darzubieten, verlassen worden ist und mag nicht ohne Bedenken sehen, wie von Band zu Band das Werk über die zu Anfang gezogenen Grenzen hinaustritt. Das Streben nach möglicher Vollständigkeit in den einzelnen Abschnitten aber und der Wunsch übersichtlich und klar zu sein, auch auf Kosten der Kürze, ein Wunsch der besonders auch aus den Kreisen der Leser wiederholt an uns herangetreten ist, bilden den unmittelbaren Grund für das Anwachsen des Umfanges. Der wesentliche Grund aber liegt wohl tiefer: Das Werk ist ein *erstes* nach seiner Aufgabe, so kann es nicht ein vollendetes sein, sie zu erfüllen. Erst wenn das gewaltige Gebiet, welches es umfasst, in dieser ersten Fassung als ein Ganzes vor uns liegt, wenn der Kreis der Probleme, die es darzulegen hat, einmal durchmessen ist, wird man übersehen können, wieviel zur Vertiefung seines Inhaltes, zur Vereinfachung und Prägnanz der Darstellung, zur Abgleichung und zum Ineinanderschliessen aller einzelnen Teile zu thun noch übrig bleibt.

* * *

Zwei für die Anerkennung der bisher geleisteten wissenschaftlichen Arbeit bedeutsame Umstände sind in unserem historischen Berichte noch zu erwähnen:

Der eine ist die Herausgabe einer französischen Bearbeitung der Encyklopädie, zu der die Verleger *B. G. Teubner* in Leipzig und *Gauthier-Villars et fils* in Paris im Jahre 1900 die Ermächtigung durch die Akademien erhielten. *J. Molk*, Professor an der Faculté des Sciences in Nancy, wurde mit der Leitung dieser Ausgabe zunächst für die der reinen Mathematik gewidmeten Bände betraut, während er für die Herausgabe der Bände der angewandten Mathematik mit *P. Appell*, Mitglied des Institut de France (Mechanik), sowie mit *A. Potier* (Physik), *Ch. Lallemant* (Geodäsie und Geophysik) und *H. Andoyer* (Astronomie) in Verbindung trat.

Es ist nicht bloss eine Übersetzung, sondern eine Bearbeitung beabsichtigt, bei welcher die ersten französischen Gelehrten ihre Beteiligung

zugesagt haben. Unter voller Erhaltung der Eigenart des deutschen Originals soll dabei in dieser Ausgabe dem Gebrauche des französischen Leserkreises Rechnung getragen und sollen andererseits unter gemeinsamer Mitarbeit der Autoren wie der Bearbeiter die einzelnen Artikel noch mannigfache Ergänzungen, besonders auch bezüglich der Litteraturzitate erfahren.*)

So wird das deutsche Werk in seiner französischen Ausgabe noch weiteren Kreisen erschlossen und in ihnen gewürdigt werden.

Eine fernere Anerkennung der bisherigen Durchführung des Werkes, die wir mit besonderer Freude begrüßen, dürfen wir darin erblicken, dass in jüngster Zeit auch die Königl. Sächsische Gesellschaft der Wissenschaften zu *Leipzig* es ermöglicht hat, an der Herausgabe der Encyclopädie sich zu beteiligen. Sie hat ihrerseits *O. Holder* in die akademische Kommission delegiert.

Damit erscheint nunmehr die Herausgabe als ein gemeinsames Unternehmen der im Kartell der deutschen Akademien vereinigten gelehrten Gesellschaften zu Göttingen, Leipzig, München und Wien und es bezeugt auch sie die Bedeutung dieser Vereinigung für die Durchführung von Aufgaben, die nur in vereinter Arbeit möglich sind; zugleich aber bietet die Autorität der Akademien, welche das Unternehmen zu dem ihren gemacht haben, die Gewähr, dass auch die künftige Gestaltung, die Vollendung des Ganzen, wie spätere Neubearbeitung in beste Hand gelegt und in ihrem wissenschaftlichen Grunde gesichert ist.

* * *

*) Der Prospekt der französischen Ausgabe kennzeichnet die Art der Bearbeitung in folgender Weise:

Dans l'édition française on a cherché à reproduire dans leurs traits essentiels les articles de l'édition allemande; dans le mode d'exposition adopté on a cependant largement tenu compte des usages et habitudes françaises.

Cette édition française offrira un caractère tout particulier par la collaboration de mathématiciens allemands et français. L'auteur de chaque article de l'édition allemande a, en effet, indiqué les modifications qu'il jugeait convenables d'introduire dans son article et, d'autre part, la rédaction française de chaque article a donné lieu à un échange de vues auquel ont pris part tous les intéressés; les additions dues plus particulièrement aux collaborateurs français seront mises entre deux astérisques. L'importance d'une telle collaboration, dont l'édition française de l'Encyclopédie offrira le premier exemple, n'échappera à personne.

So möge denn die Encyklopädie unter diesem freundlichen Aspekt, unter dem Schirm der vereinigten Akademien an ihrem Teile den Wissenschaften dienen:

Der *reinen mathematischen Forschung*, indem sie den alten viel-durchfurchten Boden zu neuer Saat und Ernte vorbereitet und neu-errungenes Land der befruchtenden Gedankenarbeit erschliesst;

den *angewandten Wissenszweigen*, indem sie die vielfach getrennten Wege mathematischer und naturwissenschaftlicher Betrachtung zusammenführt und nach Grundlage und Methode ihrer weiteren Entwicklung vorarbeitet;

der *Gesamtheit aller Geistesarbeit*, indem sie die Stellung bezeichnet und umschreibt, welche den mathematischen Wissenschaften im Bereich der menschlichen Erkenntnis zukommt.

München, 30. Juli 1904.

Walther von Dyck,

als Vorsitzender der akademischen Kommission
für die Herausgabe der Encyklopädie.

Vorrede zum ersten Bande.

Der vorliegende erste Band der Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften umfasst die *Arithmetik*, *Algebra*, *Zahlentheorie*, *Wahrscheinlichkeitsrechnung* (mit Anwendungen auf Ausgleichung und Interpolation, Statistik und Lebensversicherung), sowie einige angrenzende Disziplinen: *Differenzenrechnung*, *Numerisches Rechnen*, *Mathematische Spiele* und *Mathematische Wirtschaftslehre*.

Es sind das etwa diejenigen Teile der reinen Mathematik, die nicht spezifisch analytischen oder geometrischen Charakters sind.

Diese Abtrennung von der *Analysis* (Band II) und *Geometrie* (Band III) konnte naturgemäss keine ganz starre sein, vielfach war ein Übergreifen in jene beiden grossen Gebiete unvermeidlich, und ebenso wenig war es möglich, den Begriff der „reinen“ Mathematik überall festzuhalten. Es mag das in den Hauptzügen, dem Gange des Bandes I folgend, näher ausgeführt werden.

In der Arithmetik (Abschnitt A) bilden das Irrationale und der Grenzbegriff (A 3) zugleich die Grundlage der heutigen Analysis; bei der Konvergenz und Divergenz unendlicher Reihen, Produkte, Kettenbrüche und Determinanten waren daher analytische und auch nicht-analytische Funktionen als Belege heranzuziehen. Die Theorie der einfachen und höheren komplexen Grössen (A 4) nötigte, auf die geometrischen Eigenschaften der einfachsten kontinuierlichen Transformationsgruppen einzugehen. Die Mengenlehre (A 5) ist als fundamentales Klassifikationsprinzip für die Funktionen überhaupt von Bedeutung geworden, und neuerdings auch für die Grundlagen der Geometrie und Analysis situs.

In der Algebra (Abschnitt B) beziehen sich einige der reichsten Anwendungen der Invarianten- und Gruppentheorie (B 2, B 3 c, d, B 3 f), insbesondere der Theorie endlicher linearer Gruppen, auf bedeutsame geometrische Konfigurationen; andererseits ist die Lehre von den algebraischen Gebilden und Transformationen ebensowohl

mit der Entwicklung der algebraischen Funktionen, wie der algebraischen Geometrie auf das Engste verknüpft.

In dem Abschnitte (C) über Zahlentheorie sind es vor allem die Approximationsmethoden der analytischen Zahlentheorie (C 3), die wesentlich der Analysis entstammen und umgekehrt wiederum diese gefördert haben; als eine Hauptanwendung auf die Geometrie erscheint die Unmöglichkeit von der Quadratur des Kreises. Der Artikel (C 6) über komplexe Multiplikation liesse sich mit demselben Rechte auch als integrierender Bestandteil der Lehre von den elliptischen Funktionen auffassen.

Endlich sei noch auf die mannigfachen Beziehungen zwischen der Wahrscheinlichkeits- und Differenzenrechnung, nebst deren Anwendungen (D, E), zu der Approximation bestimmter Integrale hingewiesen, sowie auf das Eingreifen der Lehre von den allgemeinen Koordinatensystemen und der Methoden der darstellenden Geometrie in das numerische Rechnen (F).

Gerade diese letzten Abschnitte (D, E, F, G) lehren zugleich, in welchem Umfange ursprünglich aus der reinen Mathematik geschöpfte Prinzipien ihre Kraft bei der Lösung der verschiedenartigsten technischen Probleme bewähren.

Wir wenden uns nunmehr zu der systematischen Einteilung der Abschnitte in die Einzelartikel und können uns dabei um so kürzer fassen, als das ausführliche Gesamtinhaltsverzeichnis eine äussere Orientierung über die Verteilung des Stoffes ohnehin gestattet.

Der Abschnitt (A) über *Arithmetik* beginnt mit den Elementen (A 1, H. Schubert), den arithmetischen Grundoperationen und deren Anwendungen auf positive und negative, ganze und gebrochene Zahlen; hieran schliesst sich von selbst die Kombinatorik (A 2, E. Netto), deren wesentlichster Ausfluss die Lehre von den Determinanten ist.

Von den Elementen aus kann man innerhalb der Arithmetik nach vierfacher Richtung weitergehen.

Entweder man erweitert (A 3, A. Pringsheim) das Gebiet der rationalen Zahlen durch Aufnahme der irrationalen, und überträgt zugleich die arithmetischen Grundoperationen auf eine unbegrenzte Anzahl von Objekten. Daraus erwächst der Begriff der Grenze einer Zahlenfolge, und hieraus wiederum durch Spezifikation die Theorie der Konvergenz und Divergenz unendlicher Reihen, Produkte, Kettenbrüche und Determinanten. Hierbei konnte auch die Lehre von den endlichen Kettenbrüchen mit aufgenommen werden.

Zweitens kann man die Beschränkung auf das Reelle fallen lassen und das Gebiet der arithmetischen Grössen durch Schöpfung der ge-

meinen und höheren komplexen Grössen ausdehnen (A 4, E. Study); geeignete Einteilungsprinzipien ermöglichen die organische Einordnung besonderer komplexer Grössen von Bedeutung, insbesondere der Quaternionen.

Drittens lässt sich die natürliche Zahlenreihe über sich selbst hinaus fortsetzen (A 5, A. Schoenflies) und man gelangt zu den verschiedenen Modifikationen der Mengen und der transfiniten Zahlen.

Oder endlich man baut (A 6, H. Burkhardt), im Anschluss an die Kombinatorik, auf der Grundlage des Permutationsprozesses die Lehre der Substitutionen einer Anzahl von Elementen auf. Als die folgenreichste Art der Zusammenfassung von Substitutionen erweist sich die „Gruppe“, zunächst für eine endliche, weiterhin für eine unbegrenzte Reihe von Elementen oder überhaupt Operationen.

Indem man der Analysis den Begriff einer stetig variablen Grösse entlehnt, betritt man den Boden der *Algebra*, wie sie in Abschnitt B behandelt ist. Mit Hilfe der ersten drei resp. vier Rechenspezies entstehen die ganzen resp. gebrochenen rationalen Funktionen einer und mehrerer Variablen (B 1 a, b, E. Netto). Die hierher gehörigen Untersuchungen gruppieren sich um zwei Hauptprobleme, einmal um die formale Elimination von Unbekannten aus Gleichungssystemen, die in der Theorie der Modulsysteme einen gewissen Abschluss erreicht, sodann um den Existenznachweis für die Lösungen von algebraischen Gleichungen und Gleichungssystemen.

Die Theorie der ganzen Funktionen erfährt eine schärfere Ausprägung auf der Grundlage des Begriffes des „Rationalitätsbereiches“, indem die Koeffizienten der Funktionen ihrerseits wiederum als ganze Funktionen einer Anzahl von Urvariablen, aber mit nur ganzzahligen Koeffizienten aufgefasst werden (B 1 c, G. Landsberg). Dadurch gelingt es, die Eigenschaften der algebraischen Gebilde, insbesondere rationalen Transformationen gegenüber, den verschiedenen Modifikationen eines grundlegenden Prozesses unterzuordnen, der Reduktion unendlicher Funktionen- oder Formensysteme auf eine endliche Anzahl. Diese Entwicklungen dienen daher zugleich als algebraische Grundlage der höheren Zahlentheorie (Abschnitt C).

Von da an tritt im Abschnitte B wieder eine Verzweigung in Untergebiete spezifischen Charakters ein.

Abgesehen von dem Artikel B 3 a (C. Runge), der die mehr praktischen Fragen erörtert, wie man Gleichungswurzeln in geeignete Grenzen einschliessen und sie mittels numerisch brauchbarer Algorithmen approximieren kann, tritt der Gruppenbegriff als der herrschende auf. Unter den rationalen Transformationen der Variablen

ganzer Funktionen (Formen) sind in erster Linie die linearen zu berücksichtigen (B 2, W. Fr. Meyer). Unterwirft man jene Variablen irgend einer linearen Gruppe, so unterliegen die Koeffizienten der gegebenen Formen gleichfalls einer gewissen linearen Gruppe, und die Aufgabe der linearen Invariantentheorie ist, die Invarianten dieser letzteren Gruppe, oder allgemeiner, einer beliebigen linearen Untergruppe, aufzustellen, sie sachgemäss zu klassifizieren, und die unbegrenzte Reihe derselben als ganze resp. als rationale Funktionen einer endlichen Anzahl unter ihnen darzustellen. Ein besonderes Interesse beanspruchen dabei wegen ihrer Beziehungen zur Gleichungstheorie, zur Analysis und Geometrie die aus einer endlichen Anzahl von Substitutionen zusammengesetzten Gruppen, denen daher noch ein besonderer Artikel (B 3 f, A. Wiman) gewidmet ist.

Als der eigentliche Träger des ganzen Abschnitts darf die schon in B 1 c berührte *Galois'sche* Theorie der Gleichungsgruppen (B 3 c, d, O. Hölder) gelten, die, ursprünglich von der speziellen Frage nach der Auflösbarkeit gewisser Gleichungen durch Wurzelzeichen ausgehend, in ihrer weiteren Entwicklung sich die Theorien algebraischer wie arithmetischer und geometrischer Rationalitätsbereiche (sowie auch die formalen Integrationstheorien der Differentialgleichungen) untergeordnet hat. Eine Einleitung in diese Theorie bildet die Lehre (B 3 b, K. Th. Vahlen) von den ein- und mehrwertigen algebraischen Funktionen einer oder mehrerer Grössenreihen, insbesondere der Wurzeln von Gleichungen und Gleichungssystemen.

Die *Zahlentheorie* oder die explizite Ausführung der Eigenschaften der einzelnen arithmetischen Rationalitätsbereiche liesse sich vom heutigen Standpunkt aus direkt an den Artikel B 1 c anschliessen. Aus historischen Gründen empfahl sich jedoch die Gestaltung eines besonderen Abschnittes (C).

An die Darstellung der elementaren Teilbarkeitsgesetze der natürlichen Zahlen (C 1, P. Bachmann) schliesst sich die Behandlung der linearen, bilinearen, quadratischen, und gewisser höherer Formen, Gleichungen und Kongruenzen (C 2, K. Th. Vahlen); die schon in der Algebra hervorgetretenen Begriffe der Elementarteiler und des Ranges einer Matrix dienen hierbei als grundlegende Klassifikationsprinzipien.

Der folgende Artikel (C 3, P. Bachmann) über analytische Zahlentheorie wird einmal den zerstreuten Methoden über additive Zusammensetzung von Zahlen gerecht, deren systematische Behandlung noch aussteht. Andererseits geht er auf die approximative Bestimmung mittlerer Werte zahlentheoretischer Funktionen ein. Endlich werden,

im Anschluss an die periodischen Eigenschaften algebraischer Zahlen, die neuerdings hervorgetretenen Fragen nach der Transzendenz ausgezeichnete Irrationalitäten, wie e und π , erörtert.

Das Hauptziel der heutigen systematischen Zahlentheorie, die Ausdehnung der Teilbarkeitsgesetze der natürlichen Zahlen, sowie im Anschluss daran der Reziprozitätsgesetze der Potenzreste auf die algebraischen Zahlkörper, d. h. auf die rationalen Funktionen algebraischer Zahlen, insbesondere der quadratischen, wird in C 4 a, b (D. Hilbert) verfolgt. War die Aufgabe im Falle eines Kreiskörpers durch Einführung der idealen Zahlen gelöst, so treten im allgemeinen Falle die Schöpfungen der Körperideale resp. Körperformen an deren Stelle.

Der besondere Fall der in der komplexen Multiplikation der elliptischen Funktionen auftretenden quadratischen Klassenkörper findet seine Erledigung in C 6 (H. Weber).

Von der bis hierher behandelten niederen und höheren Arithmetik und Algebra lässt sich sagen, dass sie eine geschlossene Einheit ausmachen.

Nicht das Gleiche gilt von den nun folgenden, schon oben berührten Abschnitten; sie genügen mehr *der negativen Definition*, weder *zum Vorhergehenden*, noch *zu den nächsten zwei Bänden zu gehören*.

Der Abschnitt D wird im wesentlichen von der Wahrscheinlichkeitsrechnung beherrscht; wenn sich auch beispielsweise die Ausgleichungsrechnung (D 2) theoretisch ohne Hilfe spezifischer Wahrscheinlichkeitsbegriffe aufbauen lässt, so haben sich doch die einschlägigen Begriffe und Methoden an der Hand der Wahrscheinlichkeitsrechnung allmählich entwickelt.

Die *Wahrscheinlichkeitsrechnung* (D 1, E. Czuber), im Anfange nur eine Anwendung der Kombinatorik auf einige Hazardspiele, hat, vornehmlich nach Adoption infinitesimaler und geometrischer Grundbegriffe, ihren Umfang derart ausgedehnt, dass sie einer ansehnlichen Anzahl mathematischer Approximationsmethoden explizite oder implizite zu Grunde liegt. Erkenntnistheoretisch hat sie das Verdienst, den Begriff des Zufalles oder vielmehr der ihn begleitenden Umstände bis zu einem gewissen Grade in mathematische Ansätze und Gesetze aufgelöst zu haben.

Die ergiebigste Quelle der *Ausgleichungsrechnung* (D 2, J. Bauschinger) ist das Prinzip vom Minimum der Summe der Fehlerquadrate, das ja auch in modifizierter Fassung, als Prinzip vom kleinsten Zwange, als die Quelle der ganzen Dynamik dienen kann.

In der *Interpolationsrechnung* (D 3, J. Bauschinger) wird eine

beliebige, durch gewisse Daten festgelegte Funktion durch eine ganze rationale Funktion oder auch durch eine endliche trigonometrische Reihe approximiert; sowohl bei der praktischen Ausgestaltung der erforderlichen Algorithmen, wie bei der mehr theoretisch interessierenden Aufstellung der Restglieder leistet die Differenzenrechnung wertvolle Dienste, die in Art. E (D. Seliwanoff) selbständig behandelt wird.

Die Aufgaben der *Statistik* (D 4 a, L. v. Bortkiewicz) und *Lebensversicherung* (D 4 b, G. Bohlmann) sprechen für sich selbst.

Der Artikel F (R. Mehmke), über *numerisches Rechnen*, enthält mehr, als sein Titel angibt. Ausgehend von Kunstgriffen und Tabellen, die dazu dienen, das praktische Rechnen mit rationalen und irrationalen Zahlen zu erleichtern, dehnt sich der Stoff durch Verwendung der mannigfaltigsten Arten von Rechenapparaten und Maschinen zu einer weiten mathematisch-technischen Disziplin aus; darüber hinaus wird er durch Einbeziehung fruchtbarer graphischer Methoden zu einer Art geometrischer Arithmetik.

Die Artikel G 1 (W. Ahrens), G 2 (L. Pareto) über *Spiele* und *Wirtschaftslehre* mögen als Anhang angesehen werden.

Der Artikel G 3 (A. Pringsheim) über *unendliche Prozesse mit komplexen Termen*, der eine unmittelbare Ergänzung sowohl zu A 3, wie zu A 4 darstellt, war ursprünglich für den zweiten Band bestimmt. Mit Rücksicht auf seine nahe Beziehung zu diesen Aufsätzen und in Übereinstimmung mit der in der französischen Ausgabe der Encyklopädie getroffenen Anordnung ist er nachträglich dem ersten Bande als Schlussartikel zugewiesen worden.

Um dem Leser eine bequemere Handhabung des ganzen Bandes zu ermöglichen, ist derselbe in zwei Teile zerlegt worden. Aus inneren und äusseren Gründen empfahl es sich, den ersten Teil mit dem letzten Artikel (B 3 f) des Abschnittes B (Algebra) abzuschliessen.

Möge die Encyklopädie, die die mathematischen Erfindungen eines Jahrhunderts in historischer Entwicklung vorführt, auch das erkenntnistheoretische Studium der grundlegenden Frage, was in der Mathematik denn eigentlich als „neu“ zu gelten habe, beleben! Besteht das Neue in einer durch innere Anschauung gewonnenen Vermehrung und Vertiefung eines Besitzstandes aprioristischer Erkenntnisse oder kommt es nur zurück auf eine andere Gruppierung vorhandener Erfahrungsthatfachen?

Sodann sei es noch gestattet, die leitenden Gesichtspunkte auseinanderzusetzen, nach denen das *Register* bearbeitet worden ist. Dasselbe sollte ein Wort- und Sachregister sein.

In das *Wortregister* sind nur Ausdrücke aufgenommen, die in

dem vorliegenden Bande wirklich vorkommen; wenn sich diese Aufnahme auch auf eine erhebliche Anzahl von Termini erstreckt hat, die entweder veraltet, oder nur weniger im Umlauf sind, oft auch nur einer augenblicklichen Idee des Autors entsprungen sein mögen, so geschah das, um auch diejenigen, die sich für die philologische Seite der Wortbildungen interessieren, bis zu einem gewissen Grade zu befriedigen. Weniger einfach gestaltete sich die Auswahl bei dem ansehnlichen Schatze von Ausdrücken technischer Natur, wie sie sich vornehmlich in den Artikeln über Statistik und Lebensversicherung, Numerisches Rechnen, Spiele und Wirtschaftslehre vorfinden. Der Herausgeber hat sich bemüht, hierbei Ausdrücke für solche Objekte herauszugreifen, denen immer noch ein gewisses Mass mathematischer Denkweise zukommt.

Was das *Sachregister* angeht, so sei vorab auf zwei Schwierigkeiten hingewiesen, die nur annähernd gelöst werden konnten.

Das ist einmal die Frage nach den zu zitierenden *Autoren*. Mit einigen Ausnahmen sind hier bei den Stichworten nur solche Autoren berücksichtigt, die der Gegenwart nicht mehr angehören, und auch diese zumeist nur dann, wenn ihr mit einem bestimmten Begriffe oder Satze oder einer spezifischen Methode verbundener Name — oft freilich nur zufällig oder auch missbräuchlich — zu einer Art gangbarer Münze geworden ist. Andererseits lag die Versuchung nahe, wenn ein Autor angeführt wurde, hinsichtlich seiner hervorstechenden Leistungen eine gewisse Vollständigkeit anzustreben. Der an sich berechtigte Wunsch, den Mancher gehegt haben wird, dass dies Prinzip auf möglichst viele oder gar alle Autoren hätte ausgedehnt werden sollen, konnte schon mit Rücksicht auf den zur Verfügung stehenden Raum nicht befriedigt werden. Wo dagegen der Name eines Forschers, oft nur der grösseren Deutlichkeit halber, innerhalb des Registertextes erwähnt wurde, ist er nicht durch den Druck hervorgehoben worden, da eine derartige Hervorhebung für andere Zwecke vorbehalten wurde (s. u.).

Die andere Schwierigkeit lag in den *Wortbildungen* selbst. Die grosse Anzahl der Mitarbeiter lässt es erklärlich erscheinen, dass ein und dasselbe Wort durchaus nicht stets denselben Begriff bezeichnet, und dass umgekehrt ein und derselbe Begriff, von Sätzen und Methoden gar nicht zu reden, mit den verschiedensten Namen belegt wird.

Der Herausgeber hat keine Mühe gescheut, sachlich zusammengehörige Zitate auch je an einer Stelle zu vereinigen, ist sich aber sehr wohl bewusst, dass in dieser Hinsicht noch viele Lücken verblieben sein werden, und umgekehrt manches Überflüssige Eingang

gefunden hat. Dass bei Stichworten, die umfangreichere Begriffsgattungen angeben, Einzelheiten nach Möglichkeit unterdrückt werden mussten, bedarf wohl kaum der Rechtfertigung. Dass dagegen die Übersichtlichkeit des Registertextes durch häufige Einschachtelungen gelitten hat, soll ohne weiteres zugestanden werden.

Es wird vielleicht Bedenken erregen, dass auch eine Reihe von *Adjektiven* den Stichworten einverleibt wurde. Es geschah das indessen bei solchen Adjektiven, die mehr sind, als blosses Epitheta, die vielmehr eine besonders charakteristische Eigenschaft des Hauptwortes zum Ausdruck bringen. Da andererseits das Hauptwort als Stichwort nicht fehlen durfte, so gleicht das Register nach verschiedener Richtung einer mathematischen Tafel mit doppeltem, zuweilen sogar mehrfachem Eingange.

Über die Hervorhebung durch den Druck ist zu bemerken, dass die Stichworte, sowie Verweise auf solche, durch gesperrte Lettern wiedergegeben sind. Der *kursive* Druck ist verwandt zur Kenntlichmachung der Unterabschnitte innerhalb grösserer Wortartikel, sei es, dass sich diese Abschnitte auf charakteristische Bereiche des Bandes beziehen, oder auch auf Ableitungen und Zusammensetzungen des Stichwortes. Es erschien dabei zweckmässig, jene charakteristischen Bereiche der Kürze halber zum Teil besonders zu benennen. So z. B. wurden die Artikel B 1 c und C 4 a, b unter dem Gattungsnamen „Körpertheorie“ zusammengefasst, ferner die in F einen grossen Raum einnehmenden graphischen Methoden unter „Graphik“, u. a. m. Bezüglich einer spezifischen Verwendung des Semikolons, sowie runder und eckiger Klammern gibt die am Kopfe der ersten Registerseite befindliche Bemerkung Auskunft.

Von der ursprünglichen Absicht, jedes Zitat unter Anführung des Artikels und dessen Verfassers zu geben, wurde mit Rücksicht auf den Umfang Abstand genommen. Eben bezüglich des Umfanges sind dem Herausgeber die verschiedenartigsten Wünsche zugegangen, die sich etwa in den Grenzen von zwei bis zu zehn Bogen bewegen. Der thatsächliche Umfang von nicht ganz $4\frac{1}{2}$ Bogen ergibt im Verhältnis zu den $70\frac{1}{2}$ Bogen Text des Bandes einen Prozentsatz von etwas über 6%.

Zur Beurteilung des Registers sei noch auf seine Entstehung hingewiesen; erst nachdem von jedem Artikel ein gesondertes Register angefertigt war, wurden diese, so gut es anging, in ein Ganzes zusammengezogen.

Ursprünglich bestand die Absicht, dem Bande auch noch Beichtigungen und Nachträge beizufügen. Inzwischen ist das bisher in

dieser Hinsicht zusammengekommene Material so inhomogen, dass hiervon Abstand genommen wurde, in der Hoffnung, es werde später möglich sein, was ja auch aus anderen Gründen durchaus erwünscht ist, den jeweils abgeschlossenen Bänden der Encyklopädie von Zeit zu Zeit Ergänzungshefte folgen zu lassen.

Zum Schlusse erfüllt der Herausgeber gern die Pflicht, nach verschiedenen Richtungen seinen besondern Dank auszusprechen: in erster Linie den Akademikern zu Göttingen, Leipzig, München und Wien, sowie der von ihnen eingesetzten Kommission; sodann den sämtlichen Herrn Mitarbeitern des ersten Bandes, die auf ihre Beiträge namhafte Zeit und Mühe verwandt haben; ferner Herrn Kollegen H. Burkhardt, der jeden Artikel einer mehrmaligen Korrektur unterzogen und hierbei eine umfangreiche Reihe kritischer und historischer Bemerkungen beigesteuert hat; und nicht zum letzten dem Teubner'schen Verlage für sein weitgehendes Entgegenkommen bei der schwierigen und langwierigen Drucklegung.

Königsberg i/Pr., April 1904.

W. Franz Meyer

als Herausgeber.

Inhaltsverzeichnis zu Band I Teil I.

A. Arithmetik.

1. Grundlagen der Arithmetik. Von H. SCHUBERT in Hamburg.		Seite
1. Zahlen und Zahl		1
2. Addition		6
3. Subtraktion		8
4. Verbindung von Addition und Subtraktion		10
5. Null		11
6. Negative Zahlen		12
7. Multiplikation		13
8. Division		16
9. Verbindung der Division mit der Addition, Subtraktion und Multiplikation		17
10. Gebrochene Zahlen		19
11. Die drei Operationen dritter Stufe		22
(Abgeschlossen im Juli 1898.)		

2. Kombinatorik. Von E. NETTO in Giessen.		
1. Kombinatorik; historische Würdigung		29
2. Kombinatorische Operationen. Definitionen		29
3. Inversion; Transposition		30
4. Permutationen mit beschränkter Stellenbesetzung		30
5. Verwandte Permutationen		31
6. Sequenzen		31
7. Anwendung auf Fragen der Arithmetik		32
8. Kombinationen zu bestimmter Summe oder bestimmtem Produkte		32
9. Kombinationen mit beschränkter Stellenbesetzung		33
10. Tripelsysteme		33
11. Ausdehnung des Begriffs der Variation		34
12. Formeln		34
13. Binomialkoeffizienten		34
14. Anwendungen		35
15. Determinanten. Erklärung des Begriffs		36
16. Definitionen		37
17. Anzahl-Probleme hinsichtlich der Glieder		38
18. Elementare Eigenschaften		38
19. Laplace'sche und andere Zerlegungssätze		39
20. Entwicklungen		39
21. Komposition und Produkt		40
22. Andere Art von Komposition		40
23. Zusammengesetzte Determinanten		40
24. Rang der Determinante		41
25. Relationen zwischen coaxialen Subdeterminanten		42
26. Symmetrische Determinanten		42
27. Rekurrirende Determinanten. Cirkulanten		43
28. Halbsymmetrische Determinanten		43
29. Schiefe Determinanten		44
30. Centrosymmetrische und andere Determinanten		44

	Seite
31. Weitere Determinantenbildungen	44
32. Determinanten höheren Ranges	45
33. Unendliche Determinanten.	45
34. Matrizen	45
35. Monographien	46

(Abgeschlossen im Okt. 1898.)

3. Irrationalzahlen und Konvergenz unendlicher Prozesse.

Von A. PRINGSHEIM in München.

1. Irrationalzahlen. Euklid's Verhältnisse und incommensurable Größen	49
2. Michael Stifel's Arithmetica integra	50
3. Der Irrationalzahlbegriff der analytischen Geometrie	51
4. Das Cantor-Dedekind'sche Axiom und die arithmetischen Theorien der Irrationalzahlen	53
5. Die Theorien von Weierstrass und Cantor	54
6. Die Theorie von Dedekind	55
7. Du Bois-Reymond's Kampf gegen die arithmetischen Theorien	56
8. Die vollkommene Arithmetisierung im Sinne Kronecker's.	58
9. 10. Verschiedene Darstellungsformen der Irrationalzahlen und Irrationalität gewisser Darstellungsformen	59. 61
11. Der geometrische Ursprung des Grenzbegriffs	63
12. Die Arithmetisierung des Grenzbegriffs	64
13. Das Kriterium für die Grenzwertexistenz	65
14. Das Unendlichgrosse und Unendlichkleine	67
15. Oberer und unterer Limes.	70
16. Obere und untere Grenze	72
17. Das Rechnen mit Grenzwerten. Die Zahl $e = \lim \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$	73
18. Sogenannte unbestimmte Ausdrücke	74
19. Graduierung des Unendlich- und Nullwerdens	75
20. Grenzwerte zweifach-unendlicher Zahlenfolgen.	76
21. Unendliche Reihen. Konvergenz und Divergenz	77
22. 23. Die Konvergenzkriterien von Gauss und Cauchy	79. 80
24. Kummer's allgemeine Kriterien	82
25. Die Theorien von Dini, du Bois-Reymond und Pringsheim	83
26. 27. Die Kriterien erster und zweiter Art	84. 86
28. Andere Kriterienformen	88
29. Tragweite der Kriterien erster und zweiter Art	89
30. Die Grenzgebiete der Divergenz und Konvergenz	90
31. Bedingte und unbedingte Konvergenz	91
32. Wertveränderungen bedingt konvergenter Reihen	93
33. Kriterien für eventuell nur bedingte Konvergenz	94
34. Addition und Multiplikation unendlicher Reihen	96
35. Doppelreihen	97
36. Vielfache Reihen	100
37. Transformation von Reihen	101
38. Euler-Mac Laurin'sche Summenformel. Halbkongvergente Reihen	102
39. Divergente Reihen	105
40. Divergente Potenzreihen.	108
41. Unendliche Produkte. Historisches	111
42. Konvergenz und Divergenz	113
43. Umformung von unendlichen Produkten in Reihen.	114
44. Faktoriellen und Fakultäten	117
45. Kettenbrüche. Allgemeine formale Eigenschaften der Kettenbrüche	118
46. Rekursorische und independente Berechnung der Näherungsbrüche	121
47. Näherungsbrücheigenschaften besonderer Kettenbrüche	123
48. Konvergenz und Divergenz unendlicher Kettenbrüche. Allgemeines Divergenzkriterium	126
49. Kettenbrüche mit positiven Gliedern	128
50. Kongvergente Kettenbrüche mit Gliedern beliebigen Vorzeichens	129

51. Periodische Kettenbrüche	130
52. Transformation unendlicher Kettenbrüche	133
53. Umformung einer unendlichen Reihe in ein äquivalenten Kettenbruch	133
54. Anderweitige Kettenbruchentwicklungen unendlicher Reihen	135
55. Kettenbrüche für Potenzreihen und Potenzreihenquotienten	136
56. Beziehungen zwischen unendlichen Kettenbrüchen und Produkten	139
57. Aufsteigende Kettenbrüche	140
58. Unendliche Determinanten. Historisches	141
59. Haupteigenschaften unendlicher Determinanten	143

(Abgeschlossen im Sept. 1898.)

4. Theorie der gemeinen und höheren komplexen Grössen. Von E. STUDY in Greifswald (jetzt Bonn).

1. Imaginäre Grössen im 17. und 18. Jahrhundert	148
2. Rechnen mit Grössenpaaren	149
3. Gemeine komplexe Grössen	152
4. Absoluter Betrag, Amplitude, Logarithmus	155
5. Darstellung der komplexen Grössen durch Punkte einer Ebene	155
6. Darstellung gewisser Transformationsgruppen mit Hilfe gewöhnlicher komplexer Grössen	156
7. Allgemeiner Begriff eines Systems komplexer Grössen	159
8. Typen, Gestalten, Reduzibilität	162
9. Systeme mit zwei, drei und vier Einheiten	166
10. Spezielle Systeme mit n^2 Einheiten. Bilineare Formen	168
11. Spezielle Systeme mit kommutativer Multiplikation	172
12. Komplexe Grössen und Transformationsgruppen	175
13. Klassifikation der Systeme komplexer Grössen	180
14. Ansätze zu einer Funktionentheorie und Zahlentheorie der Systeme höherer komplexer Grössen	182

(Abgeschlossen im Nov. 1898.)

5. Mengenlehre. Von A. SCHÖNFLIES in Göttingen (jetzt Königsberg i. Pr.).

1. Häufungsstellen von Punktmengen und deren Ableitungen	185
2. Der Abzählbarkeitsbegriff und das Kontinuum	186
3. Cantor's erste Einführung der transfiniten Zahlen	187
4. Transfinite Mengen. Die Mächtigkeit oder Kardinalzahl	188
5. Die Ordnungstypen	190
6. Die wohlgeordneten Mengen und ihre Abschnitte	191
7. Die Ordnungszahlen und die Zahlklasse $Z(\aleph_0)$	192
8. Mengen höherer Mächtigkeit	192
9. Die allgemeinen Rechnungsgesetze der Ordnungszahlen	193
10. Die Normalform der Ordnungszahlen und die ε -Zahlen	194
11. Allgemeine Definitionen und Formeln für Punktmengen	195
12. Allgemeine Lehrsätze über Punktmengen	196
13. Die abgeschlossenen und perfekten Mengen	197
14. Zerlegung einer Menge in separierte und homogene Bestandteile	198
15. Der Inhalt von Punktmengen	199
16. Das Kontinuum	201
17. Infinitärkalkül. Die Unendlich (\aleph) der Funktionen	202
18. Das Axiom des Archimedes und die Stetigkeit	205
19. Die allgemeinsten Grössenklassen	206

(Abgeschlossen im Nov. 1898.)

6. Endliche diskrete Gruppen. Von H. BURKHARDT in Zürich.

1. Permutationen und Substitutionen	209
2. Ordnung einer Substitution	210
3. Cykeln	210
4. Analytische Darstellung von Substitutionen	211
5. Substitutionsgruppen	211

	Seite
6. Transitivität, Primitivität	212
7. Symmetrische und alternierende Gruppe	213
8. Mögliche Ordnungszahlen von Gruppen.	213
9. Mehrfach transitive Gruppen	214
10. Lineare homogene Gruppe.	214
11. Gruppe der Modulargleichung	215
12. Andere Untergruppen der linearen homogenen Gruppe.	216
13. Aufzählungen von Gruppen der niedrigsten Grade	216
14. Isomorphismus	217
15. Allgemeiner Gruppenbegriff	217
16. Normalteiler	218
17. Kompositionsreihe	220
18. Isomorphismen einer Gruppe mit sich selbst	220
19. Erzeugende Operationen. Geometrische Bilder von Gruppen	221
20. Abel'sche Gruppen	222
21. Die Sylow'schen Sätze	223
22. Einfache Gruppen	224
23. Auflösbare Gruppen	225
24. Gruppendeterminante	226

(Abgeschlossen im Nov. 1898.)

B. Algebra.

1a. Rationale Funktionen einer Veränderlichen; ihre Nullstellen. Von E. NETTO in Giessen.

1. Definitionen	228
2. Konstantenzählung. Interpolationsproblem. Partialbrüche	228
3. Interpolations- und Ausgleichungs-Rechnung	230
4. Differenzenrechnung.	231
5. Wurzeln und ihre Multiplizität. Nullstellen	232
6. Ableitung und Stetigkeit	233
7. Fundamentaltheorem der Algebra	233
8. Zerlegung in Faktoren	238
9. Rationalitätsbereich.	239
10. Reduktibilität. Irreduktibilität	239
11. Teilbarkeitseigenschaften	241
12. Grösster gemeinsamer Teiler.	241
13. Irreduktible Funktionen	242
14. Trennung vielfacher Wurzeln	243
15. Algebraische Kongruenzen.	244
16. Resultantendarstellung	245
17. Bedingungen für gemeinsame Teiler	247
18. Eigenschaften der Resultanten	248
19. Berechnung der Resultanten	249
20. Diskriminante	251
21. Eigenschaften der Diskriminante	251
22. Diskriminantenfläche	252
23. Funktionen mit reellen Nullstellen. Realitätsverhältnisse	253
24. Hinweise auf angrenzende Gebiete	253

(Abgeschlossen im Mai 1899.)

1b. Rationale Funktionen mehrerer Veränderlichen. Von E. NETTO in Giessen.

1. Definitionen	256
2. Wurzeln. — Identisches Verschwinden	256
3. Potenzentwicklung gewisser rationaler Funktionen	257
4. Mehrfache Wurzeln. — Unendlich grosse Wurzeln.	257
5. Reduktibilität und Irreduktibilität	258
6. Elimination. — Bézout'sche Methode	260

	Seite
7. Poisson'sche Methode. — Eliminate	262
8. Cayley'sche und Sylvester'sche Methode	262
9. Kronecker'sche Methode. — Stufenzahl	263
10. Minding'sche Regel. — Labatie's Theorem	264
11. Vielfache und unendliche Wurzeln eines Gleichungssystems	266
12. Auflösung linearer Gleichungen. — Spezielle Eliminationsprobleme	268
13. Eigenschaften der Eliminate	270
14. Resultante und ihre Eigenschaften	271
15. Reduzierte Resultante	273
16. Reduktibilität und Teilbarkeit von Gleichungssystemen	273
17. Diskriminante eines Gleichungssystems	274
18. Diskriminante einer Gleichung	274
19. Unabhängigkeit von Funktionen	275
20. Unabhängigkeit von Gleichungen	276
21. Funktionaldeterminante	276
22. Hesse'sche Determinante	277
23. Jacobi's Erweiterung einer Euler'schen Formel	278
24. Wurzelrelationen eines Gleichungssystems. — Interpolation	279
25. Charakteristik eines Funktionensystems	279
26. Modul- oder Divisorsysteme	280
27. Weitere Hinweise	280

(Abgeschlossen im Juli 1899.)

1c. Algebraische Gebilde. Arithmetische Theorie algebraischer Grössen. Von G. LANDSBERG in Heidelberg.

1. Aufgabe der arithmetischen Theorie der algebraischen Grössen	284
2. Körper oder Rationalitätsbereiche	284
3. Ganze Grössen eines Rationalitätsbereiches; Irreduktibilität	286
4. Konjugierte Körper; Diskriminanten	288
5. Beziehungen zur Galois'schen Theorie der Gleichungen	290
6. Fundamentalsysteme	292
7. Arten oder Spezies	294
8. Zerlegung der ganzen Grössen in Primdivisoren oder Primeideale	294
9. Darstellung der Primdivisoren durch Association enthaltender Gattungen oder durch Association transzendenter Funktionen	296
10. Die Fundamentalgleichung	298
11. Ausführung der arithmetischen Theorie im Einzelnen	299
12. Zusammenhang mit der Theorie der Modulsysteme und algebraischen Gebilde	301
13. Elementare Eigenschaften der Modulsysteme	301
14. Der Stufenbegriff. Primmodulsysteme	302
15. Zerlegung in Primmodulsysteme. Diskriminante eines Modulsystemes	305
16. Anwendungen der Modulsysteme. Komplexe Zahlen mit mehreren Einheiten	306
17. Dedekind's Theorie der Moduln	307
18. Sätze von Hilbert	309
19. Verallgemeinerung des Teilbarkeits- und Äquivalenzbegriffes	312
20. Fundamentalsatz von Noether	313
21. Modulsysteme zweiter Stufe; ihre Normalformen	314
22. Darstellung algebraischer Gebilde durch rationale Parameter; Satz von Lüroth	316
23. Transformation algebraischer Gebilde	318

(Abgeschlossen im Aug. 1899.)

2. Invariantentheorie. Von W. FR. MEYER in Königsberg i. Pr.

1. Keime der Theorie	322
2. Entwicklung des Invariantenbegriffes	323
3. Äquivalenz von quadratischen und bilinearen Formen und Formenscharen	327
4. Äquivalenz von Formen höherer als der zweiten Ordnung	334

5. Automorphe Formen. Invarianten endlicher Gruppen	336
6. Formenverwandtschaft. Endlichkeit	341
7. Associierte Formen und typische Darstellung	347
8. Syzygien.	350
9. Abzählende Richtung	353
10. Kanonisierung	356
11. Umkehrfragen. Irrationale Formen	358
12. Invariante Prozesse. Symbolik und graphische Darstellung	360
13. Aronhold's Prozess. Polaren	366
14. Überschiebungs- und Ω -Prozess. Normierung einer linearen Differentialgleichung	367
15. Substitution einseitiger Ableitungen	370
16. Substitution homogener Ableitungen	371
17. Reihenentwicklungen	373
18. Differentialgleichungen der Komitanten	375
19. Erweiterungen. Höhere Transformationen	378
20. Die erweiterte projektive Gruppe. Reciprokannten und Differentialinvarianten	380
21. Projektive Invarianten der Krümmungstheorie	383
22. Differentialformen und Differentialparameter der Flächentheorie	384
23. Besondere Gruppen und Formen. Seminvarianten	386
24. Kombinanten und Apolarität	390
25. Resultanten und Diskriminanten	395
26. Realitätsfragen	399
27. Weitere spezielle Formen und Gruppen	400

(Abgeschlossen im Sept. 1899.)

3a. Separation und Approximation der Wurzeln. Von C. RUNGE in Hannover.

1. Einleitung	405
2. Separation der Wurzeln. Grenzen für die Wurzeln	407
3. Die Differenzengleichung	408
4. Descartes' Zeichenregel und Budan-Fourier's Satz	409
5. Der Sturm'sche Satz	416
6. Cauchy's Integral	418
7. Charakteristiken-Theorie	422
8. Die quadratischen Formen im Zusammenhang mit dem Sturm'schen Satz	427
9. Numerisches Beispiel für die Separation	431
10. Approximation der Wurzeln. Das Newton'sche Verfahren	433
11. Allgemeinere Verfahren	433
12. Horner's Schema	436
13. Bernoulli's Verfahren	439
14. Graeffe's Verfahren	440
15. Die Approximation für den Fall mehrerer Veränderlichen	446

(Abgeschlossen im Sept. 1899.)

3b. Rationale Funktionen der Wurzeln; symmetrische und Affektfunktionen. Von K. TH. VAHLEN in Königsberg i. Pr.

1. Symmetrische Funktionen einer Grössenreihe; Definition, Hauptsatz, Bezeichnung; Anzahlen	450
2. Formeln und Verfahren von Cramer, Newton, Girard, Waring, Faà di Bruno	450
3. Reduktion einer Funktion nach Waring u. Gauss, nach Cauchy u. Kronecker	452
4. Das Cauchy'sche Verfahren und seine Verallgemeinerung durch Transon	452
5. Erzeugende Funktionen von Borchardt und Kronecker	453
6. Fundamentalsysteme	455
7. Sätze über Grad und Gewicht; Klassifikationen	455
8. Partielle Differentialgleichungen und Differentialoperatoren	456
9. Tabellen; tabellarische Gesetze. Das Cayley-Betti'sche Symmetriegesetz und seine Verallgemeinerung durch Mac Mahon.	460

	Seite
10. Mac Mahon's neue Theorie der symmetrischen Funktionen	462
11. Beziehungen zur Zahlentheorie.	464
12. Spezielle symmetrische Funktionen.	464
13. Symmetrische Funktionen von Wurzeldifferenzen; Seminvarianten.	466
14. Zweiwertige und alternierende Funktionen	467
15. Mehrwertige Affektfunktionen. Gruppe.	468
16. Allgemeine Sätze von Lagrange, Galois, Jordan	468
17. Mögliche Wertezahlen.	468
18. Herstellung von Affektfunktionen, Kirkman's Problem	469
19. Aufzählungen.	469
20. Rationalwerden von Affektfunktionen; Affekt einer Gleichung	469
21. Cyklische, cykloïdische, metacyklische Funktionen.	469
22. Durch Wurzeln auflösbare Gleichungen. Durch Quadratwurzeln auf lösbare Gleichungen	470
23. Gleichungen 7 ^{ten} Grades, deren 30-wertige Affektfunktionen rational sind.	470
24. Funktionen von mehreren Variablenreihen, Wurzeln von Gleichungs- systemen. Berechnung symmetrischer Funktionen nach Poisson, v. Escherich	471
25. Symmetrische Funktionen von Reihen von Variablen, die von einander unabhängig sind. Sätze, Formeln, Verfahren von Mertens, Waring, Schläfli, Mac Mahon, Junker.	473
26. Relationen zwischen den elementar-symmetrischen Funktionen: Brill und Junker	475
27. Allgemeinere Funktionen	479

(Abgeschlossen im Sept. 1899.)

3c, d. Galois'sche Theorie mit Anwendungen. Von O. HÖLDER in Leipzig.

1. Einleitung	481
2. Definition der Gruppe einer Gleichung	483
3. Weitere Eigenschaften der Gruppe	485
4. Wirkliche Herstellung der Gruppe	486
5. Monodromiegruppe	487
6. Transitivität und Primitivität	487
7. Adjunktion einer natürlichen Irrationalität	488
8. Cyklische Gleichungen	490
9. Reine Gleichungen	490
10. Zerlegung des Gleichungsproblems durch Resolventenbildung.	491
11. Adjunktion einer accessorischen Irrationalität	493
12. Adjunktion eines Radikals	495
13. Begriff der Auflösung.	495
14. Kriterium der Auflösbarkeit.	496
15. Behandlung nicht auflösbarer Gleichungen	497
<hr/>	
16. Allgemeine Gleichungen	498
17. Gleichungen der ersten vier Grade	499
18. Nichtauflösbarkeit der allgemeinen Gleichungen höherer Grade.	504
19. Gleichungen mit regulärer Gruppe	505
20. Gleichungen mit kommutativer (permutabler) Gruppe	505
21. Abel'sche Gleichungen	506
22. Kreisteilungsgleichungen	507
23. Teilungs- und Transformationsgleichungen der elliptischen Funktionen	509
24. Reduktion von Gleichungen auf Normalformen	513
25. Irreducible Gleichungen von Primzahlgrad	515
26. Sylow'sche Gleichungen	516
27. Casus irreducibilis der kubischen Gleichung	517
28. Konstruktion mit Zirkel und Lineal	518
29. Geometrische Gleichungen	518

(Abgeschlossen im Okt. 1899.)

3e. Gleichungssysteme. Von E. NETTO in Giessen und
K. TH. VAHLEN in Königsberg i. Pr. (Siehe: B 1b und B 3b.)

3f. Endliche Gruppen linearer Substitutionen. Von A. WIMAN
in Lund.

	Seite
1. Periodische Substitutionen	523
2. Endliche binäre Gruppen	523
3. Erweiterungen	526
4. Algebraisch integrierbare lineare Differentialgleichungen 2. Ordnung	527
5. Endliche ternäre Gruppen	528
6. Algebraisch integrierbare lineare Differentialgleichungen höherer Ordnung	530
7. Gruppen aus den regulären Körpern in höheren Räumen	530
8. Invariante definite Hermite'sche Formen	532
9. Erste Auflösung der Gleichungen 5. Grades	533
10. Lösung durch Vermittlung der Jacobi'schen Gleichungen 6. Grades	534
11. Satz betreffend die Möglichkeit von Resolventen mit nur einem Parameter	536
12. Lösung durch die Ikosaederirrationalität	537
13. Zurückführung der Gleichungen 5. Grades auf ein ternäres Formenproblem	540
14. Auflösung durch elliptische Transformationsgrößen und hypergeometrische Funktionen	541
15. Die allgemeinen algebraischen Formenprobleme	543
16. Gleichungen 7. Grades mit einer Gruppe von 168 Substitutionen	544
17. Kollineationsgruppen der elliptischen Normalkurven	545
18. Gruppen aus der elliptischen Transformationstheorie	546
19. Mit den Gleichungen 6. u. 7. Grades isomorphe quaternäre Formenprobleme	547
20. Reduktion der allgemeinen Gleichungen 6. Grades auf ein ternäres Formenproblem	548
21. Satz über die allgemeinen Gleichungen höheren Grades	549
22. Quaternäre Gruppe von 11520 Kollineationen	549
23. Quaternäre und quinäre Gruppen aus der Dreiteilung der hyperelliptischen Funktionen	551
24. Gruppen von eindeutigen Transformationen einer algebraischen Kurve in sich	552
25. Endliche Gruppen von birationalen Transformationen	553
26. Erweiterung auf unendliche diskontinuierliche Gruppen	554

(Abgeschlossen im Dez. 1899.)

Inhaltsverzeichnis der einzelnen Hefte zu Band I Teil I mit ihren Ausgabedaten.

1. Teil.

A. Arithmetik.

- | | | |
|--------------|---|--|
| Heft 1. | { | 1. SCHUBERT: Grundlagen der Arithmetik. |
| 7. XI. 1898. | | 2. NETTO: Kombinatorik. |
| | | 3. PRINGSHEIM: Irrationalzahlen und Konvergenz unendl. Prozesse. |
| Heft 2. | { | 4. STUDY: Theorie der gemeinen und höheren komplexen Größen. |
| 26. I. 1899. | | 5. SCHOENFLIES: Mengenlehre. |
| | | 6. BURKHARDT: Endliche diskrete Gruppen. |

B. Algebra.

- | | | |
|---------------|---|--|
| Heft 3. | { | 1. Grundlagen: |
| 15. IX. 1899. | | 1a. NETTO: Rationale Funktionen einer Veränderlichen; ihre Nullstellen. |
| | | 1b. NETTO: Rationale Funktionen mehrerer Veränderlichen. |
| | | 1c. LANDSBERG: Algebraische Gebilde. Arithmetische Theorie algebraischer Größen. |
| | | 2. MEYER: Invariantentheorie. |
| Heft 4. | { | 3. Gleichungen: |
| 17. X. 1899. | | 3a. RUNGE: Separation und Approximation der Wurzeln. |
| | | 3b. VAHLEN: Rationale Funktionen der Wurzeln; Symmetrische und Affektfunktionen. |
| | | 3c. d. HÖLDER: Galois'sche Theorie mit Anwendungen. |
| Heft 5. | { | 3e. NETTO u. VAHLEN: Gleichungssysteme. (Siehe: B 1b u. B 3b.) |
| 29. V. 1900. | | 3f. WIMAN: Endliche Gruppen linearer Substitutionen. |
-

I A 1. GRUNDLAGEN DER ARITHMETIK.

(DIE VIER GRUNDRECHNUNGSARTEN; EINFÜHRUNG DER NEGATIVEN
UND DER GEBROCHENEN ZAHLEN; OPERATIONEN DRITTER STUFE
IN FORMALER HINSICHT.)

VON

H. SCHUBERT

IN HAMBURG.

Inhaltsübersicht.

1. Zählen und Zahl.
2. Addition.
3. Subtraktion.
4. Verbindung von Addition und Subtraktion.
5. Null.
6. Negative Zahlen.
7. Multiplikation.
8. Division.
9. Verbindung der Division mit der Addition, Subtraktion und Multiplikation.
10. Gebrochene Zahlen.
11. Die drei Operationen dritter Stufe.

1. Zählen und Zahl. Dinge¹⁾ zählen heisst, sie als gleichartig²⁾ ansehen, zusammen auffassen²⁾, und ihnen einzeln andere Dinge zu-

1) Dass auch *unkörperliche* Dinge gezählt werden können, betont *G. F. Leibniz*, den Scholastikern gegenüber, „*De arte combinatoria*“ (1666), ebenso *J. Locke* in seinem Werke „*An Essay concerning human understanding*“ (1690, Book II). Dagegen sieht *J. St. Mill* (*Logic*, Book III, 26) die in der Definition einer Zahl ausgesagte Thatsache als eine *physische* an, ähnlich *G. Frege*, „*Grundlagen der Arithmetik*“ (Breslau 1884).

2) Dass dem Zählprozess einerseits ein Zusammenfassen der zu zählenden Dinge, andererseits aber auch die Erkenntnis der *Gleichartigkeit* der zu zählenden Dinge vorangehen muss, hebt *E. Schröder* in seinem „*Lehrbuch der Arithmetik*“ (Leipzig 1873) p. 4 hervor, ebenso *E. Mach* in seinem Buch „*Die Principien der Wärmelehre*“ (Leipzig 1896) (Nr. 7).

ordnen³⁾, die man auch als gleichartig ansieht⁴⁾. Jedes von den Dingen, denen man beim Zählen andere Dinge zuordnet, heisst *Ein-*

3) Dass ein Zählen nicht ohne ein mehr oder weniger bewusstes *Zuordnen* oder Abbilden möglich ist, pflegte *K. Weierstrass* in der Einleitung zu seinen Vorlesungen über die Theorie der analytischen Functionen hervorzuheben. (Man vgl. *E. Kossak* „Die Elemente der Arithmetik“, Berlin, Progr. Friedr. Werder-Gymn., 1872). Ebenso betonen dies *E. Schröder* in seinem Lehrbuch, *L. Kronecker* in seinem Aufsätze „Über den Zahlbegriff“ (Philosophische Aufsätze, Zeller gewidmet, Leipzig 1887, Journ. f. Math. 101), *R. Dedekind* in seiner Schrift „Was sind und was sollen die Zahlen?“ (Braunschweig 1887 und 1893), in welcher das „Zuordnen“ durch eine Reihe von Definitionen (Kette) und Lehrsätzen eingehend analysiert wird.

4) In dieser Definition der Zahl stimmen wohl alle Philosophen und Mathematiker im wesentlichen überein. Wohl aber gehen die Ansichten darüber auseinander, welche psychischen Momente die Bildung des Zahlbegriffs ermöglichen. Nach dem Vorbilde I. Kant's betont *W. R. Hamilton* als das Fundament des Zahlbegriffs die Anschauungsform der *Zeit*. Algebra ist ihm „Science of Order in Progression“ oder „Science of Pure Time“. Er spricht dies zuerst aus in der in den *Dubl. Trans.* 17, II (1835) erschienenen Abhandlung „Theory of Conjugate Functions or Algebraic Couples with a Preliminary and Elementary Essay on Algebra as the Science of Pure Time“. Später wiederholt er diese Ansicht in der Vorrede zu seinem Werke „Lectures on Quaternions“ (Dublin 1853). Auf demselben Standpunkt steht *H. Helmholtz* in seiner Abhandlung „Zählen und Messen“, in den *Eduard Zeller* gewidmeten philosophischen Aufsätzen (Leipzig 1887); ebenso auch *W. Brialmont* in seiner Abhandlung „Der mathematische Zahlbegriff und seine Entwicklungsformen“ (Band V und VI der von *Wundt* herausgegebenen Philosophischen Studien; auch als Dissertation, Leipzig 1889). erschienenen). Dagegen sagt *J. F. Herbart* in seiner „Psychologie als Wissenschaft“ (Königsberg 1824, Band II), dass die Zahl mit der Zeit nicht mehr zu thun habe, als viele andere Vorstellungsarten. *J. J. Baumann* und *F. A. Lange* meinen, dass die Zahl weit besser mit der *Raumvorstellung* als mit der *Zeitvorstellung* in Einklang stehe, und zwar *J. J. Baumann* in seinem Werke „Die Lehre von Raum, Zeit und Mathematik in der neueren Philosophie“ (Berlin 1869) und *F. A. Lange* in seinen „Logischen Studien“ von 1877. Ebenso bekämpft *E. G. Husserl* die Bestrebungen, welche den Zahlbegriff auf die Vorstellung der Zeit gründen, und zwar im I. Bande seines Werkes „Philosophie der Arithmetik“, Halle 1891.

Häufig wird *Aristoteles* als derjenige hingestellt, der zuerst die Zahl definiert hat, und zwar aus dem Begriff der Zeit. Dies ist nicht richtig. *Aristoteles* definiert umgekehrt die Zeit mittelst des Zahlbegriffs und zwar in seiner „*Physica auscultatio*“ (IV. Buch, 11. Kapitel, p. 219 β oder deutsche Übersetzung von *Prantl*, Leipzig 1854, p. 207 u. f.), wo es heisst: „Zeit ist die Zahl der Bewegung nach dem Früher und Später“ und weiterhin: „Zeit ist die Zahl der Raumbewegung“. Der oft wiederholte Ausspruch *Euclid's* (Elemente, VII. Buch) „Die Zahl ist eine Vielheit von Einheiten“ kann kaum als Definition aufgefasst werden.

Analysen des Zahlbegriffs sind ausser in den schon zitierten Schriften namentlich noch in den folgenden neueren Abhandlungen und Büchern zu finden:

heit⁵⁾; jedes von den Dingen, die man beim Zählen andern Dingen zuordnet, heisst *Einer*⁵⁾). Das Ergebnis des Zählens heisst *Zahl*. Wegen der Gleichartigkeit der Einheiten unter einander und der Einer unter einander ist die Zahl unabhängig von der Reihenfolge, in welcher den Einheiten die Einer zugeordnet werden⁶⁾).

Wenn man bei einer Zahl durch einen hinzugefügten Sammelbegriff daran erinnert, inwiefern die Einheiten als gleichartig angesehen wurden, spricht man eine *benannte Zahl* aus. Durch vollständiges Absehen von der Natur der gezählten Dinge gelangt man vom Begriff der benannten Zahl zum Begriff der *unbenannten Zahl*. Unter Zahl schlechthin ist immer eine unbenannte Zahl zu verstehen.

Um Zahlen *mitzuteilen*, kann man als Einer irgend welche gleichartigen Dinge wählen (Finger, Rechenkugeln, Kreidestriche). Wilde Völker, die keine Schrift haben, nehmen Steine oder Muscheln als Einer, wenn sie Zahlen mitteilen wollen. Ordnet man den zu zählenden Dingen gleichartige Schriftzeichen zu, so erhält man die *natürlichen Zahlzeichen*⁷⁾. So stellten in ältester Zeit die Römer die Zahlen von eins bis neun durch Aneinanderreihung von Strichen, die Azteken

W. Wundt, Logik, Band I;

G. Frege, Grundlagen der Arithmetik, Breslau 1884;

R. Lipschitz, Grundlagen der Analysis, Bonn 1877 (§ 1);

U. Dini, Grundlagen für eine Theorie der Functionen einer veränderlichen Grösse, übersetzt von J. Lüroth (Leipzig 1892);

G. Peano, Arithmetices principia nova methodo exposita, Torino 1889;

K. Th. Michaelis, Über Kant's Zahlbegriff, Progr. Charlottenburg, Berlin, bei Gärtner, 1884;

E. Knoch, Über den Zahlbegriff und den elementaren Unterricht in der Arithmetik, Programm des Realprogymnasiums in Jenkau, 1892;

G. F. Lipps, Untersuchungen über die Grundlagen der Mathematik in Wundt's Philosophischen Studien (von Band X an); das vierte Kapitel (in Band XI) enthält die logische Entwicklung des Zahlbegriffs.

Von diesen Autoren knüpfen G. Peano und E. Knoch an Dedekind's Abbildungen in dessen schon zitierter Schrift an.

Auf den Zahlbegriff lassen sich die Gesetze der Arithmetik *ohne irgend ein Axiom* aufbauen, wie u. a. K. Weierstrass in seinen Vorlesungen betonte.

5) Die Unterscheidung von Einheiten und Einern in diesem Sinne rührt von E. Schröder her (Lehrbuch der Arithmetik und Algebra, Leipzig 1873, p. 5 oder Abriss der Arithmetik und Algebra, erstes Heft, p. 1).

6) H. Helmholtz und L. Kronecker, in den schon zitierten Aufsätzen zu Zeller's Jubiläum, denken sich die Zuordnung so, als wenn den zu zählenden Einheiten die Zahlen Eins, Zwei, Drei u. s. w. zugeordnet werden. Diese Ansicht bekämpft E. G. Husserl im Anhang zum ersten Teile seiner „Philosophie der Arithmetik“ (Halle 1891).

7) Über *Zahl-Mitteilung* und *Zahl-Darstellung* durch Wort oder Schrift findet man Eingehendes in folgenden Schriften:

die Zahlen von eins bis neunzehn durch Zusammenstellung einzelner Kreise dar. Die modernen Kulturvölker haben natürliche Zahlzeichen nur noch auf den Würfeln, den Dominosteinen und den Spielkarten. Ordnet man den zu zählenden Dingen gleichartige Laute zu, so erhält man die natürlichen Zahllaute, wie sie z. B. die Schlagwerke der Uhren ertönen lassen. Statt solcher natürlicher Zahlzeichen und Zahllaute gebraucht man gewöhnlich Zeichen und Wörter, die sich aus wenigen elementaren Zeichen und Wortstämmen methodisch zusammensetzen⁷⁾. Die moderne Zifferschrift, welche auf dem Princip des Stellenwertes und der Einführung eines Zeichens für nichts beruht, ist von indischen Brahma-Priestern erfunden, gelangte um 800 zur Kenntnis der Araber und um 1200 nach dem christlichen Europa, wo im Laufe der folgenden Jahrhunderte die neue Zifferschrift und das neue Rechnen allmählich das Rechnen mit römischen Ziffern verdrängte⁷⁾.

Die Lehre von den Beziehungen der Zahlen zu einander heisst *Arithmetik* (*ἀριθμῆς*, Zahl). *Rechnen* heisst, aus gegebenen Zahlen gesuchte Zahlen methodisch ableiten. In der Arithmetik ist es üblich, eine beliebige Zahl durch einen *Buchstaben* auszudrücken, wobei nur zu beachten ist, dass innerhalb einer und derselben Betrachtung der-

-
- M. Cantor*, Mathematische Beiträge zum Kulturleben der Völker, Halle 1863;
G. Friedlein, Die Zahlzeichen und das elementare Rechnen der Griechen und Römer und des christlichen Abendlandes vom 7. bis 13. Jahrhundert, Erlangen 1869; Gerbert, Die Geometrie des Boethius und die indischen Ziffern, Erlangen 1861.
H. Hankel, Zur Geschichte der Mathematik im Altertum und Mittelalter, Leipzig 1874;
M. Cantor, Vorlesungen über Geschichte der Mathematik, Leipzig 1880, I. Band;
A. F. Pott, Die quinäre und vigesimale Zählmethode bei Völkern aller Weltteile, Halle 1847;
A. F. Pott, Die Sprachverschiedenheit in Europa, an den Zahlwörtern nachgewiesen, Halle 1868;
K. Fink, Kurzer Abriss einer Geschichte der Elementar-Mathematik, Tübingen 1890;
A. von Humboldt, Über die bei verschiedenen Völkern üblichen Systeme von Zahlzeichen und über den Ursprung des Stellenwertes in den indischen Zahlen (J. f. Math., Band 4);
P. Treutlein, Progr. Gymn. Karlsruhe 1875.
M. Chasles, Sur le passage du premier livre de la géométrie de Boèce, Brux. 1836; Aperçu historique ..., Brux. 1837; Par. C. R. 4, 1836; 6, 1838; 8, 1839.
F. Unger, Die Methodik der praktischen Arithmetik in historischer Entwicklung, Leipzig 1888;
H. G. Zeuthen, Geschichte der Mathematik im Altertum und Mittelalter, Kopenhagen 1896;
H. Schubert, Zählen und Zahl, eine kulturgeschichtliche Studie, in Virchow-Holtzendorff's Sammlung gemeinv. wiss. Vorträge, Hamburg 1887.

selbe Buchstabe auch immer nur eine und dieselbe Zahl bedeuten darf⁸⁾.

*Gleich*⁹⁾ heissen zwei Zahlen a und b , wenn die Einheiten von a und die von b sich einander so zuordnen lassen, dass alle Einheiten von a und von b an dieser Zuordnung teilnehmen. *Ungleich*⁹⁾ heissen zwei Zahlen a und b , wenn ein solches Zuordnen nicht möglich ist. Da beim Zählen die Einheiten als gleichartig betrachtet werden, so ist es für die Entscheidung, ob a und b gleich oder ungleich sind, gleichgültig, welche Einheiten von a und von b einander zugeordnet werden. Wenn zwei Zahlen ungleich sind, so nennt man die eine die *grössere*, die andere die *kleinere*⁹⁾. a heisst grösser als b , wenn sich die Einheiten von a und die von b einander so zuordnen lassen, dass zwar alle Einheiten von b , aber nicht alle von a an dieser Zuordnung teilnehmen. Das Urteil, dass zwei Zahlen gleich, bzw. ungleich sind, heisst eine *Gleichung*, bzw. *Ungleichung*. Für gleich, grösser, kleiner benutzt man in der Arithmetik bzw. die drei Zeichen $=$, $>$, $<$,⁹⁾ die man zwischen die verglichenen Zahlen setzt. Wenn man aus mehreren Vergleichen einen Schluss zieht, so deutet man dies durch einen wagerechten Strich an. Die fundamentalsten Schlüsse der Arithmetik sind:

$$\frac{a}{b} = \frac{b}{a}; \quad \frac{a}{b} > \frac{b}{a}; \quad \frac{a}{b} < \frac{b}{a}.$$

Diese Schlüsse beziehen sich auf nur zwei verglichene Zahlen. Auf drei Zahlen beziehen sich die folgenden Schlüsse:

8) Die ersten Keime einer arithmetischen Buchstabenrechnung finden sich schon bei den Griechen (Nikomachos um 100 n. Chr., Diophantos um 300 n. Chr.), mehr noch bei den Indern und Arabern (Alchwarizmi um 800 n. Chr., Alkalsâdi um 1450). Die eigentliche Buchstabenrechnung mit Verwendung der Zeichen $=$, $>$, $<$ und der Operationszeichen ist jedoch erst im 16. Jahrhundert ausgebildet (Vieta † 1603), vor allem in Deutschland und Italien. Das jetzt übliche Gleichheitszeichen findet sich zuerst bei *R. Recorde* (1556). Hierüber Näheres in:

L. Matthiessen, Grundzüge der antiken und modernen Algebra der litteralen Gleichungen, 1878;

P. Treutlein, Die deutsche Coss, Zeitschr. f. Math., Band 24;

S. Günther, Geschichte des math. Unterrichts im deutschen Mittelalter bis zum Jahre 1525, Berlin 1887; Beiträge zur Erfindung der Kettenbrüche, Progr., Weissenburg 1872; Vermischte Untersuchungen zur Geschichte der math. Wissenschaften, Leipzig 1876.

Erst durch *L. Euler* (von 1707—1783) hat die arithmetische Zeichensprache die heutige festere Gestalt bekommen.

9) Eine genauere Analyse der Begriffe gleich, mehr, weniger, grösser und kleiner findet man in *E. G. Husserl's* Philosophie der Arithmetik, Band I, Kap. 5 und 6 (Halle 1891), woselbst auch weitere philosophische Literatur zu finden ist.

$$\begin{array}{llll} a = m & a > m & a < m & a > m \\ b = m & b = m & b = m & m > b \\ a = b & a > b & a < b & a > b \end{array}$$

2. Addition¹⁰⁾. Wenn man zwei Gruppen von Einheiten hat, und zwar so, dass nicht allein alle Einheiten jeder Gruppe gleichartig sind, sondern dass auch jede Einheit der einen Gruppe jeder Einheit der andern Gruppe gleichartig ist, so kann man zweierlei thun: entweder man kann jede Gruppe einzeln zählen und jedes der beiden Zähl-Ergebnisse als Zahl auffassen oder man kann die Zählung über beide Gruppen erstrecken und das Zähl-Ergebnis als Zahl auffassen. Im ersteren Falle erhält man zwei Zahlen, im letzteren Falle nur eine Zahl. Man sagt dann von dieser im

10) Der hier im Text vollzogene logisch genaue *Aufbau* der vier fundamentalen Operationen der Arithmetik wurde am ausführlichsten von *E. Schröder* in seinem Lehrbuch (Leipzig 1873, Band I: Die sieben algebraischen Operationen) durchgeführt. Ausser ihm haben Verdienste um einen solchen Aufbau:

- 1) *M. Ohm*, Versuch eines vollkommen konsequenten Systems der Arithmetik (2 Bände, II. Auflage, Berlin 1829);
- 2) *W. R. Hamilton*, Preface zu den Lectures on Quaternions, Dublin 1853.
- 3) *M. Cantor*, Grundlage einer Elementararithmetik, Heidelberg 1855;
- 4) *H. Grassmann*, Lehrbuch der Arithmetik, Berlin 1861;
- 5) *H. Hankel*, Theorie der komplexen Zahlssysteme, Leipzig 1867 (Abschnitt I, II, III);
- 6) *J. Bertrand*, Traité d'arithmétique, 4. édition, Paris 1867;
- 7) *R. Baltzer*, Die Elemente der Mathematik, I. Band, letzte (7.) Auflage, Leipzig 1885;
- 8) *O. Stolz*, Vorlesungen über allgemeine Arithmetik, Leipzig 1885.

Eine Verbindung des konsequenten Aufbaues mit didaktischen Rücksichten auf Anfänger versuchte zuerst *E. Schröder* in seinem Abriss der Arithmetik und Algebra, I. Heft, Leipzig 1874, dann ausführlicher *H. Schubert* in seinen Lehrbüchern (Sammlung von arithmetischen und algebraischen Fragen und Aufgaben, vier Auflagen, Potsdam 1883 bis 1896, System der Arithmetik, Potsdam 1885, Arithmetik und Algebra in Sammlung Göschen (Leipzig 1896 und 1898).

In früheren Jahrhunderten herrschte sogar noch Unklarheit darüber, welche Operationen als arithmetische Grund-Operationen zu betrachten sind, so um die Mitte des 15. Jahrhunderts bei *J. Regiomontanus*, *G. v. Peurbach*, *Lucius Pacioli* und im *Bamberger Rechenbuch*. *Peurbach's* Algorithmus kennt z. B. acht Grund-Operationen, nämlich Numeratio, Additio, Subtractio, Mediatio, Duplatio, Multiplicatio, Divisio, Progressio.

Im Zusammenhang mit allgemeineren Gesichtspunkten erscheinen die Operationen und Gesetze der Arithmetik in der *formalen Arithmetik*, im *Logikkalkül* und in der *Begriffsschrift*. Die formale Arithmetik studiert die Beziehungen von Grössen, ohne Rücksicht darauf, dass diese Grössen Zahlen sind. Namentlich lese man hierzu einerseits *H. Grassmann's* Ausdehnungslehre, 1844 und 1878, andererseits *H. Hankel's* Theorie der komplexen Zahlssysteme, Leipzig 1867. Bezüglich des Logikkalküls und der Begriffsschrift vgl. man Bd. VI.

letzteren Falle erhaltenen Zahl, dass sie die *Summe* der beiden im ersten Falle erhaltenen Zahlen sei, und diese beiden Zahlen nennt man die *Summanden* der Summe. Der soeben geschilderte Übergang von zwei Zahlen zu einer einzigen heisst *Addition*. Zählen und Addieren unterscheiden sich also nur dadurch, dass man beim Zählen mit einer einzigen Gruppe, beim Addieren mit zwei Gruppen von Einheiten zu thun hat. Um anzudeuten, dass aus zwei Zahlen a und b eine dritte Zahl s durch Addition hervorgegangen ist, setzt man das Zeichen $+$ (plus) zwischen die beiden Summanden. Aus den Erklärungen des Grösserseins und der Addition folgt: Eine Summe ist grösser als einer ihrer Summanden, nämlich um den andern Summanden. Wenn $a > b$ ist, so kann a Summe von zwei Summanden sein, von denen der eine b ist.

Aus dem Begriff des Zählens folgt, dass es immer nur eine Zahl geben kann, welche die Summe zweier beliebigen Zahlen ist, und dass es umgekehrt auch nur eine Zahl geben kann, die, mit einer gegebenen Zahl durch Addition verbunden, zu einer *grösseren* gegebenen Zahl als Summe führt.

Da das Ergebnis des Zählens unabhängig von der Reihenfolge ist, in der man zählt, so muss sein:

$$a + b = b + a.$$

Man nennt das hierin ausgesprochene Gesetz das *Commutationsgesetz*¹¹⁾ der Addition. Trotz dieses Gesetzes kann man begrifflich die beiden

11) Wenn $+$ das Zeichen für eine ganz allgemein gedachte Verknüpfung zweier Grössen ist, so gilt für diese Verknüpfung das *commutative* Gesetz (Commutationsgesetz), wenn $a + b = b + a$ ist, das *associative* Gesetz (Associationsgesetz), wenn $(a + b) + c = a + (b + c)$ ist. Wenn ferner \times das Zeichen für eine zweite allgemein gedachte Verknüpfung ist, so gilt für beide das *distributive* Gesetz (Distributionsgesetz), wenn $(a + b) \times c = (a \times c) + (b \times c)$ ist, oder wenn $(a \times b) + c = (a + c) \times (b + c)$ ist. Die Unterscheidung dieser drei Grundgesetze und deren Namen findet man in Deutschland zuerst bei *H. Hankel* (Theorie der komplexen Zahlssysteme, Leipzig 1867), in England schon seit etwa 1840, und zwar sind (nach Hankel) die Ausdrücke *commutativ* und *distributiv* zuerst von *Servois* (Gergonne's Ann., Bd. V, 1814, p. 93) gebraucht, *associativ* wahrscheinlich zuerst von *Hamilton*. Auch in allgemeineren Beziehungen als den arithmetischen Operationen spielen diese drei Grundgesetze eine fundamentale Rolle, so in der formalen Mathematik, dem Logikkalkül und der Begriffsschrift. (Vgl. hier Bd. VI.) Im Logikkalkül bedeutet $a + b$ alles, was entweder a oder b ist, $a \cdot b$ alles, was zugleich a und b ist. Für jede dieser Operationen gilt das *commutative* und das *associative* Gesetz. Ausserdem gilt das *distributive* Gesetz in beiderlei Gestalt, indem $(a + b) \cdot c = (a \cdot c) + (b \cdot c)$ und ausserdem $(a \cdot b) + c = (a + c) \cdot (b + c)$ ist. Hierauf machte *E. Schröder* in seiner Schrift „Operationskreis des Logikkalküls“ (Leipzig 1877) aufmerksam.

Summanden unterscheiden, indem man bei der Operation des Addierens den einen als passiv¹²⁾, den andern als aktiv¹²⁾ auffasst. Den passiven Summanden könnte man *Augend*¹²⁾, den aktiven *Auctor*¹²⁾ (Increment¹²⁾) nennen. Diese begrifflich mögliche Unterscheidung ist wegen des Commutationsgesetzes arithmetisch unnötig.

Aus dem Begriff des Zählens folgt ferner:

$$(a + b) + c = a + (b + c).$$

Das durch diese Gleichung ausgesprochene Gesetz heisst das *Associationsgesetz*¹¹⁾ der Addition.

Aus der Eindeutigkeit der Addition allein folgt das Gesetz über die Verbindung zweier Gleichungen durch Addition, wonach aus $a = b$ und $c = d$ folgt: $a + c = b + d$. Wie aber eine Gleichung und eine Ungleichung oder zwei Ungleichungen zu verbinden sind, kann nur durch Anwendung des Associationsgesetzes erkannt werden. Die vereinigte Wirkung beider Grundgesetze der Addition ergibt:

Wenn beliebig viele Zahlen in beliebiger Reihenfolge durch Addition so verbunden werden, dass immer die Summe zweier Zahlen wieder als Summand einer neuen Addition auftritt, so ist die Zahl, die das schliessliche Ergebnis darstellt, immer dieselbe, gleichviel, in welcher Reihenfolge die vorliegenden Zahlen durch Addition verbunden werden.

Diese Wahrheit berechtigt dazu, das letzte Ergebnis die *Summe aller* gegebenen Zahlen zu nennen, und damit den Begriff der Summe dahin zu erweitern, dass dieselbe nicht allein zwei, sondern beliebig viele Summanden haben darf.

3. Subtraktion¹⁰⁾. Bei der Addition sind zwei Zahlen, die beiden Summanden a und b , gegeben, und aus ihnen geht eine dritte Zahl, die Summe s , hervor. Wenn man nun umgekehrt die Summe s und den einen Summanden als gegeben betrachtet, so geht der andere Summand daraus als eine Zahl hervor, die (nach Nr. 2) eine ganz bestimmte ist. Die Aufsuchung dieser Zahl aus der Summe s und dem gegebenen Summanden nennt man *Subtraktion*¹³⁾. Die Zahl s , die früher Summe

12) Die Unterscheidung der beiden durch eine arithmetische Operation verknüpften Zahlen durch die Ausdrücke *passiv* und *aktiv* gab zuerst *E. Schröder* in seinem „Abriss der Arithmetik und Algebra“ (Leipzig 1874). Bei der Addition nennt er die passive Zahl *Augend*, die aktive *Increment*. *H. Schubert* unterscheidet *Augend* und *Auctor*, z. B. in seiner „Arithmetik und Algebra“ in „Sammlung Götschen“ (Leipzig).

13) Addition, Multiplikation und Potenzierung nennt man gewöhnlich direkte Operationen und ihre Umkehrungen indirekte Operationen. Bei *H. Hankel* (Theorie

war, wird bei der soeben definierten *umgekehrten*¹³⁾ Rechnungsart *Minuend* genannt. Der gegebene Summand könnte als aktive Zahl „*Minutor*“ genannt werden. Üblich ist jedoch dafür der Name *Subtrahend*. Das Ergebnis der Subtraction heisst *Differenz*. Das Zeichen der Subtraktion ist ein wagerechter Strich (minus), vor den man den Minuend und hinter den man den Subtrahend setzt. Es ist also:

$$(s - a) + a = s$$

die *Definitionsformel* der Subtraktion. Aus der Eindeutigkeit der Subtraktion folgt hieraus zweitens:

$$(s + a) - a = s.$$

Auf der Definition der Subtraktion beruht auch die *Transpositionsregel erster Stufe*, wonach ein Subtrahend (Summand) auf der einen Seite einer Gleichung dort fortgelassen werden darf, um auf der andern Seite als Summand (Subtrahend) zu erscheinen. Durch Transponieren kann ein unbekannter Summand oder ein unbekannter Minuend *isoliert* werden, d. h. es kann dafür gesorgt werden, dass er auf der einen Seite einer Gleichung allein steht.

Identisch heisst eine Gleichung, die immer richtig bleibt, was für Zahlen man auch für die in ihr auftretenden Buchstaben setzen mag. *Formel* heisst eine identische Gleichung, wenn sie dazu dient, eine Wahrheit in arithmetischer Zeichensprache auszudrücken. *Bestimmungsgleichung* heisst eine Gleichung, die nur richtig wird, wenn die darin auftretenden Buchstaben durch bestimmte (nicht durch alle) Zahlen ersetzt werden. Wenn in einer Bestimmungsgleichung alle vorkommenden Zahlen bis auf eine bekannt sind, so pflegt man die noch unbekannte Zahl mit x ¹⁴⁾ zu bezeichnen, und es entsteht dann die Aufgabe, die Gleichung zu *lösen*, d. h. die Zahl zu suchen, die man für x setzen muss, damit die Gleichung richtig wird. Eine Gleichung, in der x Summand oder Minuend ist, löst man durch die Transpositionsregel erster Stufe.

der komplexen Zahlssysteme, Leipzig 1867) gehören die direkten Operationen der Arithmetik zu den *thetischen*, die indirekten zu den *lytischen* Verknüpfungsarten. Aus der thetischen Verknüpfungsart $a \succ b = c$ folgen die beiden lytischen $c \top a = b$ und $c \perp b = a$.

14) Bei Diophantos wird die Unbekannte durch ein Schluss-Sigma als den letzten Buchstaben von $\alpha\epsilon\iota\vartheta\upsilon\omicron\varsigma$ bezeichnet. Über die Entstehung der Bezeichnung x für eine unbekannte Zahl lese man: *Treutlein*, Die deutsche Coss, Zeitschr. f. Math. Bd. 24 und die mehrfach angezeifelte Ansicht von P. A. de Lagarde, Woher stammt das x der Mathematiker? (Gött. Nachr., 1882).

4. **Verbindung von Addition und Subtraktion.** Aus der Definition der Subtraktion folgen bei Anwendung des Commutationsgesetzes und des Associationsgesetzes der Addition die vier Formeln:

$$\begin{aligned} a + (b - c) &= (a + b) - c, \\ a - (b + c) &= (a - b) - c, \\ a - (b - c) &= (a - b) + c, \\ a - b &= (a - n) - (b - n). \end{aligned}$$

Da bei jeder dieser Formeln mindestens auf einer der beiden Seiten eine Differenz steht, so handelt es sich beim Beweise derselben nur darum, zu *prüfen*, ob die andere Seite die durch die Definition der Subtraktion vorgeschriebene Eigenschaft erfüllt, bei welcher Prüfung nur die beiden Grundgesetze der Addition oder eine Formel angewandt werden darf, die hier der zu beweisenden voraussteht und deshalb schon als bewiesen gelten kann.

Da aus $p = q$ nach Nr. 1 $q = p$ folgt, so enthält jede arithmetische Formel zwei Wahrheiten, die man erhält, je nachdem man die Formel von links nach rechts oder von rechts nach links auffasst. Wenn man das Associationsgesetz der Addition und die ersten drei der vier obigen Formeln von links nach rechts liest, so ergeben sie Regeln über Addieren und Subtrahieren von Summen und Differenzen. Wenn man sie von rechts nach links liest, so ergeben sie Regeln über Vermehrung und Verminderung von Summen und Differenzen. Auch liefern diese Formeln den Beweis dafür, dass Summanden und Subtrahenden in beliebige Reihenfolge gebracht werden können, sowie endlich die Regeln, nach denen aus einer Gleichung und einer Ungleichung oder aus zwei Ungleichungen durch Subtraktion der rechten und der linken Seiten eine neue Ungleichung erschlossen werden kann.

Die arithmetische Zeichensprache⁸⁾ hat sich so ausgebildet, dass bei den Operationen der Addition und Subtraktion die Klammer¹⁵⁾ um die *voranstehende* Rechnungsart fortgelassen werden darf, um die nachfolgende aber gesetzt werden muss, so dass das Associationsgesetz der Addition und die drei ersten der obigen Formeln auch so geschrieben werden dürfen:

15) Über das Setzen von *Klammern* in der Arithmetik spricht zuerst *H. Schröder* in seinem Lehrbuch die folgende allgemeine Regel aus: Ein Ausdruck, der Teil eines neuen Ausdrucks ist, wird in eine Klammer eingeschlossen. Allmählich ist es gebräuchlich geworden, diese Klammer in zwei Fällen fortzulassen, erstens wenn von zwei *gleichstufigen* Operationen die *voranstehende* zuerst ausgeführt werden soll, zweitens, wenn von zwei *ungleichstufigen* Operationen die *höherer* Stufe zuerst ausgeführt werden soll.

$$a + (b + c) = a + b + c; \quad a + (b - c) = a + b - c;$$

$$a - (b + c) = a - b - c; \quad a - (b - c) = a - b + c.$$

5. Null¹⁶). Da nach der Definition der Subtraktion der Minuend eine Summe ist, deren einer Summand der Subtrahend ist, so hat die Verknüpfung zweier gleicher Zahlen durch das Minuszeichen keinen Sinn. Eine solche Verknüpfung hat zwar die *Form* einer Differenz, stellt aber keine Zahl im Sinne von Nr. 1 dar. Nun befolgt aber die Arithmetik ein Princip, das man das *Princip der Permanenz*¹⁷) oder der Ausnahmslosigkeit nennt und das in viererlei besteht:

erstens darin, jeder Zeichen-Verknüpfung, die keine der bis dahin definierten Zahlen darstellt, einen solchen Sinn zu erteilen, dass die Verknüpfung nach denselben Regeln behandelt werden darf, als stelte sie eine der bis dahin definierten Zahlen dar;

zweitens darin, eine solche Verknüpfung als Zahl im erweiterten Sinne des Wortes zu definieren und dadurch den Begriff der Zahl zu erweitern;

drittens darin, zu beweisen, dass für die Zahlen im erweiterten Sinne dieselben Sätze gelten, wie für die Zahlen im noch nicht erweiterten Sinne;

*viertens darin, zu definieren, was im erweiterten Zahlengebiet gleich, grösser und kleiner heisst*¹⁹).

Demgemäss wird die Zeichen-Verknüpfung $a - a$ den beiden Grundgesetzen der Addition und der Definitionsformel der Subtraktion unterworfen, wodurch erzielt wird, dass die Formeln von Nr. 4 auch für die Zeichen-Verknüpfung $a - a$ gelten müssen. Durch Anwen-

16) Als gemeinsames Zeichen für alle Differenzformen, in denen Minuendus und Subtrahendus gleich sind, tritt die Null erst seit dem 17. Jahrhundert auf. Ursprünglich war die Null nur ein *Vacat-Zeichen* für eine fehlende Stufenzahl in der von den Indern erfundenen Stellenwert-Zifferschrift. (Man vgl. die in Anmerkung 7 angegebene Litteratur.) Sie heisst im Rechenbuch des im 14. Jahrhundert lebenden Mönchs Maximus Planudes (deutsch von H. Wachske, Halle 1878) „tziphra“, woraus das englische cypher und das französische zéro für Null entstanden sind. Das auch von tziphra herkommende deutsche Wort Ziffer hat im Deutschen eine allgemeinere Bedeutung gewonnen. Andere Zifferschriften, wie die additive der Römer oder die multiplikative der Chinesen, haben kein Zeichen für Null.

17) Das Princip der *Permanenz*, dem hier im Text die für die Erweiterung des Zahlbegriffs geeignete Gestalt gegeben ist, ist in allgemeinster Form zuerst von H. Hankel (§ 3 der Theorie der komplexen Zahlssysteme, Leipzig 1867) ausgesprochen, nachdem schon G. Peacock die Notwendigkeit einer rein formalen Mathematik und im Zusammenhang damit ein Princip betont hatte, aus dem durch Erweiterung das der Permanenz hervorgeht (G. Peacock in Brit. Ass. III, London 1834, Symbolical Algebra, Cambridge 1845).

dung der Formel $a - b = (a - n) - (b - n)$ auf $a - a$ erkennt man dann, dass alle Differenzformen, bei denen der Minuendus gleich dem Subtrahendus ist, einander gleichzusetzen sind. Dies berechtigt dazu, für alle diese einander gleichen Zeichen-Verknüpfungen ein gemeinsames festes Zeichen einzuführen. Es ist dies das Zeichen 0 (null)¹⁶⁾. Man nennt ferner das, was dieses Zeichen aussagt, eine „Zahl“, die man auch Null nennt. Da aber Null kein Ergebnis des Zählens (Nr. 1) ist, so hat der Begriff der Zahl durch die Aufnahme der Null in die Sprache der Arithmetik eine Erweiterung erfahren. Aus der Definition $a - a = 0$ ergibt sich, wie man mit Null bei der Addition und Subtraktion zu verfahren hat, nämlich: $p + 0 = p$, $0 + p = p$, $p - 0 = p$; $0 + 0 = 0$, $0 - 0 = 0$.

6. Negative Zahlen¹⁸⁾. Wenn in $a - b$ der Minuend a kleiner als der Subtrahend b ist, so stellt $a - b$ keine Zahl im Sinne von Nr. 1 dar. Nach dem in Nr. 5 eingeführten Princip der Permanenz¹⁷⁾ muss dann die Differenzform $a - b$ der Definitionsformel der Subtraktion $a - b + b = a$ unterworfen werden, woraus hervorgeht, dass dann die in Nr. 4 behandelten Formeln auf $a - b$ auch in dem Fall anwendbar werden, wo $a < b$ ist. Hierdurch erkennt man, dass alle Differenzformen einander gleich¹⁹⁾ gesetzt werden können, bei denen der Subtrahend um gleichviel grösser ist als der Minuend. Es liegt daher nahe, alle Differenzformen $a - b$, bei denen b um p grösser als a ist, durch p auszudrücken. Indem man endlich solche Differenzformen auch „Zahlen“

18) Obwohl bei einem logischen Aufbau der Arithmetik die Einführung der *negativen Zahlen* der Einführung der gebrochenen Zahlen vorangehen muss, so sind doch historisch die negativen Zahlen viel später in Gebrauch gekommen, als die gebrochenen Zahlen. Die griechischen Arithmetiker rechneten nur mit Differenzen, in denen der Minuend grösser als der Subtrahend war. Die ersten Spuren eines Rechnens mit negativen Zahlen finden sich bei dem indischen Mathematiker *Bhāskara* (geb. 1114), der den negativen und den positiven Wert einer Quadratwurzel unterscheidet. Auch die Araber erkannten negative Wurzeln von Gleichungen. *L. Pacioli* am Ende des 15. Jahrhunderts und *Cardano*, dessen *Ars magna* 1550 erschien, wissen zwar etwas von negativen Zahlen, legen ihnen aber keine selbstständige Bedeutung bei. *G. Cardano* nennt sie *aestimationes falsae* oder *factae*, *Michael Stifel* (in seiner 1544 erschienenen *Arithmetica integra*) nennt sie *numeri absurdi*. Erst *Th. Harriot* (um 1600) betrachtet negative Zahlen für sich und lässt sie die eine Seite einer Gleichung bilden. Das eigentliche Rechnen mit negativen Zahlen beginnt jedoch erst mit *R. Descartes* († 1650), der einem und demselben Buchstaben bald einen positiven, bald einen negativen Zahlenwert beilegte.

19) Dass die durch eine Erweiterung des Zahlbegriffs hervorgerufene Erweiterung der Begriffe gleich, grösser und kleiner einer näheren Erörterung bedarf, wird in neueren guten Lehrbüchern hervorgehoben.

nennt, erweitert man den Zahlbegriff und gelangt zur Einführung der *negativen Zahlen*. Demgemäss lautet die Definitionsformel der negativen Zahl $-p$ (minus p):

$$-p = b - (b + p).$$

Im Gegensatz zu den negativen Zahlen heissen die in Nr. 1 definierten Ergebnisse des Zählens *positive Zahlen*. Aus der Definitionsformel der negativen Zahl $-p$ folgt für $b=0$, dass $-p=0-p$, und da auch $p=0+p$ ist, so liegt es nahe, $+p$ für p zu setzen. Die vor eine Zahl (im Sinne von Nr. 1) gesetzten Plus- und Minuszeichen heissen *Vorzeichen*. Negative Zahlen haben also das Vorzeichen minus, positive das Vorzeichen plus. Von den beiden Vorzeichen heisst das eine das *umgekehrte* des andern. Mit Vorzeichen versehene Zahlen heissen *relativ*. Lässt man bei einer relativen Zahl das Vorzeichen fort, so entsteht eine Zahl im Sinne von Nr. 1, die man den *absoluten Betrag*²⁰⁾ der relativen Zahl nennt. Aus diesen Definitionen folgt, wie relative Zahlen durch Addition und durch Subtraktion zu verknüpfen sind. Als Ergebnis erscheint immer eine relative Zahl oder Null.

Die Einführung der relativen Zahlen ermöglicht es, eine beliebige klammerlose Aufeinanderfolge von Additionen und Subtraktionen als eine „*Summe*“ von lauter relativen Zahlen aufzufassen. Man nennt eine so aufgefasste Summe eine *algebraische* und die relativen Zahlen, die sie zusammensetzen, ihre *Glieder*. Steht eine algebraische Summe in einer Klammer, vor der ein Pluszeichen bzw. Minuszeichen steht, so darf dieselbe fortgelassen werden, wenn man die Vorzeichen der in ihr enthaltenen Glieder sämtlich beibehält bzw. sämtlich umkehrt.

Durch die Einführung der Zahl Null (Nr. 5) und der negativen Zahlen erhalten die in Nr. 2 und Nr. 4 angedeuteten Vergleichungsschlüsse einen ausgedehnteren Sinn, wenn man auch auf die neu eingeführten Zahlen die Ausdrücke grösser und kleiner anwendet. Man nennt nämlich immer, gleichviel ob a und b null, positiv oder negativ sind, $a > b$, wenn $a - b$ positiv ist, $a < b$, wenn $a - b$ negativ ist¹⁹⁾.

Endlich machen die neu eingeführten Zahlen auch solche Gleichungen lösbar, die nach dem ursprünglichen Zahlbegriff als unlösbar gelten mussten. So ist die Gleichung $x + 5 = 5$ nach Nr. 1 unlösbar, nach Nr. 5 aber lösbar. So ist ferner die Gleichung $x + 5 = 3$ nach Nr. 1 unlösbar, nach dieser Nummer aber lösbar¹⁷⁾.

7. Multiplikation¹⁰⁾. Da wegen der Grundgesetze der Addition die Reihenfolge, in welcher Additionen ausgeführt werden, das Ergebnis

20) Der Ausdruck „absoluter Betrag“ für den Modul jeder komplexen Zahl ist durch K. Weierstrass' Vorlesungen gebräuchlich geworden.

unverändert lässt, so konnte am Schluss von Nr. 2 das Ergebnis beliebig vieler aufeinanderfolgender Additionen als eine *Summe von vielen* Summanden aufgefasst werden. Stellen die letzteren nun sämtlich eine und dieselbe Zahl a dar, so liegt es nahe, diese Zahl nur einmal zu setzen und ein Zeichen hinzuzusetzen, welches angiebt, *wieviel* Summanden a die Summe enthalten soll. Man gelangt dadurch zu einer *neuen* Verknüpfung zweier Zahlen, nämlich der Zahl a , welche als Summand gedacht ist und der Zahl p , welche zählt, *wie oft* dieser Summand gedacht ist. Man nennt diese neue Verknüpfung *Multiplikation* und bezeichnet sie als Rechnungsart *zweiter Stufe*, während man die Addition und ihre Umkehrung, die Subtraktion, Rechnungsarten *erster Stufe* nennt. Eine Zahl a (passiv) mit einer Zahl p (aktiv) multiplizieren heisst also, eine Summe von p Summanden berechnen, von denen jeder a heisst. Die Zahl a , welche als Summand dabei auftritt, heisst *Multiplikand*, die Zahl p , welche zählt, *wie oft* der Summand gedacht ist, heisst *Multiplikator*. Das Ergebnis heisst Produkt. Wegen Nr. 5 und Nr. 6 kann der Multiplikand positiv, null oder negativ sein. Der Multiplikator aber, der angiebt, *wieviel* Summanden gemeint sind, kann nur ein Ergebnis des Zählens, also nur eine Zahl im Sinne von Nr. 1 sein. Indem eine Zahl a auch als Summe von einem einzigen Summanden aufgefasst wird, darf der Multiplikator auch die Zahl 1 sein. Das Zeichen der Multiplikation ist ein zwischen dem Multiplikand a und dem Multiplikator p gesetzter Punkt. Die Definitionsformel der Multiplikation lautet hiernach:

$$\begin{array}{ccccccc} & 1) & 2) & 3) & & p) & \\ a \cdot p = & a & + & a & + & a & + \dots + a, \end{array}$$

wo die jedem Summanden übergesetzte Zahl angiebt, der wievielte Summand er ist. Früher setzte man statt des Punktes das Zeichen \times .

Aus der Eindeutigkeit der Addition folgt die Eindeutigkeit der Multiplikation, und daraus folgt, dass Gleiches mit Gleichem multipliziert, Gleiches ergibt. Aus der Definitionsformel der Multiplikation ergeben sich durch die Formeln von Nr. 3 und Nr. 4 die vier *Distributionsgesetze*¹¹⁾:

- I. $a \cdot p + a \cdot q = a \cdot (p + q)$;
- IIa. $a \cdot p - a \cdot q = a \cdot (p - q)$, wenn $p > q$ ist;
- IIb. $a \cdot p - a \cdot q = 0$, wenn $p = q$ ist;
- IIc. $a \cdot p - a \cdot q = -[a \cdot (q - p)]$, wenn $q > p$ ist;
- III. $a \cdot p + b \cdot p = (a + b) \cdot p$;
- IV. $a \cdot p - b \cdot p = (a - b) \cdot p$.

[Über das Fortlassen der Klammern auf den linken Seiten dieser Formeln lese man Anmerkung 15.]

Die Formeln I und II zeigen, vorwärts gelesen, wie ein gemeinsamer Multiplikand *abgesondert* wird, rückwärts gelesen, wie *mit* einer Summe bzw. Differenz multipliziert wird. Die Formeln III und IV zeigen, vorwärts gelesen, wie ein gemeinsamer Multiplikator *abgesondert* wird, rückwärts gelesen, wie eine Summe bzw. Differenz multipliziert wird. Aus den Distributionsgesetzen ergibt sich, wie eine Gleichung und eine Ungleichung oder zwei Ungleichungen durch Multiplikation zu verbinden sind, falls die vier verglichenen Zahlen positiv sind.

Wie ein Produkt zu behandeln ist, dessen Multiplikand null oder negativ ist, geht aus Nr. 5 und Nr. 6 hervor. Wenn aber bei einem Produkte der *Multiplikator null oder negativ* ist, so stellt dies zunächst eine sinnlose Zeichen-Verknüpfung dar. Nach dem Princip der Permanenz¹⁷⁾ ist derselben nun ein Sinn zu erteilen, der es gestattet, dass man damit nach denselben Regeln rechnen kann, als wenn der Multiplikator eine Differenz ist, die eine Zahl im Sinne von Nr. 1 darstellt. Deshalb ist bei der Formel II die Beschränkung $p > q$ aufzuheben, um aus ihr zu entnehmen, wie *mit* Null und negativen Zahlen multipliziert wird. So ergibt sich, dass $a \cdot 0 = 0$ und $a \cdot (-w) = -(a \cdot w)$ ist. Hieraus ergibt sich dann auch, wie relative Zahlen durch Multiplikation zu verknüpfen sind.

Aus den Distributionsgesetzen folgt auch, dass für die Multiplikation das *Commutationsgesetz*¹¹⁾ und das *Associationsgesetz*¹¹⁾ richtig sind.

Das Commutationsgesetz der Multiplikation hebt die Notwendigkeit der Unterscheidung von Multiplikand und Multiplikator für die reine Arithmetik auf. Man bezeichnet deshalb beide mit dem gemeinsamen Namen *Faktor* und schreibt sie in beliebiger Reihenfolge. Das Produkt nennt man ein *Vielfaches* von jedem seiner Faktoren und jeden Faktor einen *Teiler* des Produktes. Ferner nennt man bei einem Produkte jeden Faktor den *Koeffizienten* des andern.

Bei benannten Zahlen tritt die Unterscheidung von Multiplikand und Multiplikator dadurch hervor, dass der erstere zwar benannt sein kann, der letztere aber unbenannt sein muss. Deshalb ist bei benanntem Multiplikand das Commutationsgesetz sinnlos.

Für die Arithmetik der unbenannten Zahlen folgt aus der vereinigten Wirkung des Commutationsgesetzes und des Associationsgesetzes, dass die Reihenfolge, in welcher Multiplikationen auf einander folgen, bezüglich des schliesslichen Ergebnisses gleichgültig ist. Dies berechtigt dazu, den Begriff des Produktes dahin zu erweitern, dass dasselbe nicht bloss zwei, sondern beliebig *viele Faktoren* haben darf.

Dadurch, dass diese Faktoren alle dieselbe Zahl darstellen können, ist die Möglichkeit der Definition einer direkten Operation dritter Stufe, der Potenzierung²¹⁾, gegeben.

Eine algebraische Summe, deren Glieder auch Produkte sein können, heisst *Polynom*. Zwei Polynome multipliziert man, indem man jedes Glied des einen mit jedem Gliede des andern multipliziert und die erhaltenen Produkte wieder zu einer algebraischen Summe zusammenfasst. Dabei wird jedes Glied positiv oder negativ, je nachdem es aus Gliedern mit gleichen oder mit ungleichen Vorzeichen durch Multiplikation entsteht. Der Beweis dieser Regel folgt aus den Formeln I bis IV.

Aus den bisher entwickelten Definitionen und Resultaten lässt sich schliessen, dass, wenn beliebig viele Zahlen, die null oder relativ sind, in beliebiger Weise durch Addition, Subtraktion und Multiplikation verbunden werden, das schliessliche Ergebniss immer null oder relativ, also eine der bisher definierten Zahlen, sein muss.

8. **Division**¹⁰⁾. Die Division geht aus der Multiplikation durch Umkehrung¹³⁾ hervor, nämlich dadurch, dass das Produkt und der eine Faktor als gegeben, der andere Faktor als gesucht betrachtet wird. Dabei erhält die Zahl, die vorher Produkt war, den Namen *Dividend*, der gegebene Faktor den Namen *Divisor*, der gesuchte Faktor den Namen *Quotient*. Das Zeichen der Division ist ein Doppelpunkt (gelesen: durch), vor den man den Dividend und hinter den man den Divisor setzt. Demgemäss lautet die *Definitionsformel der Division*:

$$(p:a) \cdot a = p.$$

Statt $p:a$ schreibt man auch $\frac{p}{a}$, seltener p/a . Wie die Subtraktion hat auch die Division begrifflich zwei Umkehrungen, da sowohl der passive Faktor, der Multiplikand, als auch der aktive Faktor, der Multiplikator, gesucht werden kann. Ist der Dividend eine benannte Zahl, so heisst die Aufsuchung des Multiplikand *Teilung*, die des Multiplikators *Messung*. Wegen des Commutationsgesetzes ist es jedoch bei unbenannten Zahlen unnötig, die beiden Umkehrungen der Multiplikation zu unterscheiden. Damit $p:a$ Sinn habe, muss p ein Produkt sein können, dessen einer Faktor a ist, d. h. p muss ein Vielfaches von a , oder, was dasselbe ist, a ein Teiler von p sein.

Daraus, dass $0 \cdot m = 0$ ist, folgt zweierlei:

21) Vgl. hier Nr. 11.

1) Null dividiert durch Null ist jeder beliebigen Zahl gleich zu setzen. Daher nennt man die Zeichen-Verknüpfung $0:0$ *vieldeutig*.

2) Null dividiert durch jede beliebige Zahl ergibt immer die Zahl Null.

Wenn aber der Divisor null ist und der Dividend nicht null, sondern eine beliebige relative Zahl p ist, so entsteht die Frage, welche Zahl, mit Null multipliziert, zur relativen Zahl p führt. Da keine der bisher definierten Zahlen die verlangte Eigenschaft hat, so ist das Princip der Permanenz¹⁷⁾ anzuwenden. Die Untersuchung aber, *welcher* Sinn dann $p:0$ beizulegen ist, wenn p nicht null ist, gehört in ein anderes Kapitel der Mathematik (vgl. I A 3).

Da die Division nur dann eindeutig zu einer der schon definierten Zahlen führt, wenn der Divisor nicht Null ist, so darf man aus zwei Gleichungen nur dann durch Division eine dritte erschliessen, *wenn die Divisoren von Null verschieden sind*. Auf der Ausserachtlassung dieser Einschränkung beruhen viele Trugschlüsse der elementaren Arithmetik wie auch der höheren Analysis.

Wie relative Zahlen dividiert werden, folgt aus den entsprechenden Regeln für die Multiplikation relativer Zahlen.

Aus der Definitionsformel der Division folgt auch:

$$(p \cdot a):a = p, \text{ falls } a \text{ nicht Null ist.}$$

Diese Formel ergibt im Verein mit der Definition der Division die Regel, dass Multiplikation und Division mit derselben Zahl sich aufheben, *falls diese Zahl nicht Null ist*.

Daraus, dass die beiden Gleichungen $x \cdot b = p$ und $x = p:b$ sich gegenseitig bedingen, falls b nicht Null ist, ergibt sich die *Transpositionsregel zweiter Stufe*. Durch zweitstufiges Transponieren kann man entweder einen unbekannten Faktor oder einen unbekannten Divisor isolieren und dadurch die Lösung von Bestimmungsgleichungen bewerkstelligen.

9. Verbindung der Division mit der Addition, Subtraktion und Multiplikation. Mit Hilfe der Definitionsformel der Division (Nr. 8) kann man die Richtigkeit folgender Formeln erkennen:

$$\text{I. } (a + b):m = a:m + b:m,$$

$$\text{II. } (a - b):m = a:m - b:m,$$

$$\text{III. } a \cdot (b:c) = a \cdot b:c,$$

$$\text{IV. } a:(b \cdot c) = a:b:c,$$

$$\text{V. } a:(b:c) = a:b \cdot c,$$

$$\text{VI. } a:b = (a \cdot m):(b \cdot m),$$

$$\text{VII. } a:b = (a:n):(b:n).$$

[Über das Fortlassen der Klammern auf den rechten Seiten von F. I bis V lese man Anm. 15.]

Hierbei sind die auftretenden Divisoren natürlich als Teiler des zugehörigen Dividend aufzufassen. Insbesondere darf auch keiner der Divisoren null sein. Die Formeln III, IV, V, VII entsprechen in der zweiten Stufe genau den vier in Nr. 4 für die erste Stufe aufgestellten Formeln.

Die beiden Distributionsformeln III und IV in Nr. 7, sowie die hier mit I und II bezeichneten Formeln lehren, in der einen Richtung gelesen, wie eine Summe oder Differenz multipliziert oder dividiert wird, in der andern Richtung gelesen, wie Produkte mit gleichem Faktor oder Quotienten mit gleichem Divisor addiert oder subtrahiert werden. Im ersten Falle werden Klammern gelöst, im zweiten gesetzt.

Aus den Formeln I und II folgt auch, wie eine algebraische Summe durch eine Zahl dividiert wird, und wie umgekehrt eine beliebige algebraische Summe von Quotienten mit gemeinsamem Divisor in einen Quotienten verwandelt werden kann, dessen Divisor der gemeinsame Divisor aller Glieder ist. Wenn bei einer algebraischen Summe von Quotienten die *Divisoren verschieden* sind, so kann man diese Quotienten durch Formel VI in andere Quotienten verwandeln, die alle denselben Divisor (General-Divisor) haben, und dann die soeben genannte Regel anwenden.

Das Associationsgesetz der Multiplikation und die obigen Formeln III, IV, V lehren, je nachdem man sie in der einen oder in der andern Richtung liest, sowohl, wie mit Produkten oder Quotienten multipliziert oder dividiert wird, als auch, wie Produkte oder Quotienten multipliziert oder dividiert werden. Im ersten Falle werden Klammern gelöst, im zweiten gesetzt. Ferner zeigen diese Formen, dass Faktoren und Divisoren in beliebige Reihenfolge gebracht werden können, ohne dass das schliessliche Ergebnis sich dadurch ändert.

Wenn zwei Quotienten gleichen positiven Divisor haben, so stellt derjenige die grössere Zahl dar, der den grösseren Dividend hat. Wenn aber zwei Quotienten, deren Dividend und Divisor positiv sind, gleichen Dividend haben, so stellt derjenige, der den grösseren Divisor hat, die *kleinere* Zahl dar. Diese Regeln folgen aus den aufgestellten Formeln und ergeben, wie eine Ungleichung und eine Gleichung oder zwei Ungleichungen durch Division zu verbinden sind, wenn die Divisoren positiv und Teiler der zugehörigen Dividen den sind.

10. Gebrochene Zahlen²¹⁾. In § 5 und § 6 schuf das Princip der Permanenz¹⁷⁾ aus $a - b$, wo a nicht grösser als b ist, die Null und die negativen Zahlen. In derselben Weise entstehen aus $a:b$, wo a kein Vielfaches von b ist, die *gebrochenen Zahlen*, und zwar dadurch, dass man die Definitionsformel der Division

$$(a:b) \cdot b = a$$

auf $a:b$ überträgt, falls a kein Vielfaches von b ist. So erreicht man auch die Übertragung aller bisher aufgestellten Definitionen und Formeln auf die Quotientenform $a:b$ und die Aufhebung der in Nr. 8 und Nr. 9 ausgesprochenen Beschränkung, „falls der Divisor ein Teiler des Dividend ist“. Insbesondere erscheint nun die Gleichung $b \cdot x = a$ auch dann lösbar, wenn b kein Teiler von a ist.

Indem man die Quotientenform $a:b$, wo b kein Teiler von a ist, eine „Zahl“ nennt, erweitert man von neuem den Begriff der Zahl, vergrössert man das Untersuchungsfeld der Arithmetik und vervollkommnet man die Mittel²²⁾, mit denen sie arbeitet. Im Gegensatz zu den so entstehenden gebrochenen Zahlen heissen alle bisher definierten Zahlen (Nrn. 1, 5, 6) *ganze Zahlen*. Den Dividend a eines Bruches $a:b$ nennt man seinen *Zähler*, den Divisor b seinen *Nenner*. Man bezeichnet einen Bruch durch einen wagerechten Strich²¹⁾, eine darüber gesetzte ganze Zahl, die sein Zähler ist, und eine darunter gesetzte ganze Zahl, die sein Nenner ist.

21) Mit *Brüchen* wurde schon im Altertum gerechnet. Ja, das älteste mathematische Handbuch, der *Papyrus Rhind* im Britischen Museum, enthält schon eine eigenartige Bruchrechnung (Näheres in *M. Cantor's* Geschichte der Mathematik, Band I), in der jeder Bruch als Summe verschiedener *Stammbrüche* geschrieben wird. Die *Griechen* unterschieden in ihrer Buchstaben-Zifferschrift Zähler und Nenner durch verschiedene Strichelung der Buchstaben, bevorzugten aber Stammbrüche. Die *Römer* suchten die Brüche als Vielfache von $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ u. s. w. bis $\frac{1}{256}$ darzustellen, im Zusammenhang mit ihrer Münz-Einteilung. Die *Inder* und *Araber* kannten Stammbrüche und abgeleitete Brüche, bevorzugten aber, ebenso wie die *alten babylonischen* und, ihnen folgend, die *griechischen Astronomen*, *Sexagesimalbrüche* (vgl. Anmerkung 24). Der *Bruchstrich* und die heutige Schreibweise der Brüche rührt von *Leonardo* von Pisa (genannt *Fibonacci*) her, dessen *liber abaci* (um 1220) die Quelle für die Rechenbücher der nächsten Jahrhunderte wurde.

22) Dass die Einführung der negativen und der gebrochenen Zahlen von der Algebra entbehrt werden kann, und dass jene Zahlen nur Symbole sind, die das Rechnen erleichtern, führte *L. Kronecker* in seiner Abhandlung „Über den Zahlbegriff“ (J. f. Math. 101, 1887) aus. Nach *Kronecker* dienen also die Erweiterungen des Zahlbegriffs nur zu dem, was *E. Mach* „Oekonomie der Wissenschaft“ nennt. (Vgl. *E. Mach*, Mechanik, Leipzig 1883; Populärwissenschaftliche Vorlesungen, Leipzig 1896; Die Principien der Wärmelehre, Leipzig 1896, p. 391 u. f.)

Um Brüche zu vergleichen, bringt man sie durch Anwendung der Formel VI in Nr. 9 auf gleichen Nenner und nennt einen Bruch *gleich* einem andern, *grösser* oder *kleiner*²³⁾, als der andere, wenn sein Zähler gleich dem Zähler des andern Bruches ist, grösser oder kleiner als dessen Zähler ist. Einen Bruch $\frac{a}{b}$ nennt man grösser oder kleiner als die ganze Zahl c , je nachdem $a > b \cdot c$ oder $a < b \cdot c$ ist. Ein Bruch, der kleiner als 1 ist, heisst *echt*, ein Bruch, der grösser als 1 ist, *unecht*. Durch Anwendung der Betrachtungen in Nr. 5 und Nr. 6 auf Brüche gelangt man zu den Begriffen des negativen Bruches, des positiven Bruches, des relativen Bruches und des absoluten Betrages²⁴⁾ eines relativen Bruches. Jede der bisher definierten Zahlen ist also Null oder positiv-ganz oder negativ-ganz oder positiv-gebrochen oder negativ-gebrochen. Man fasst alle Zahlen, die eins dieser Merkmale haben, also alle bisher definierten Zahlen, durch das Wort „*rationale*“²⁵⁾ zusammen, im Gegensatz zu den später definierten irrationalen Zahlen (vgl. I A 3). Die Regeln, wie rationale Zahlen durch Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division zu verknüpfen sind, gehen aus den in den früheren Paragraphen aufgestellten Formeln hervor.

Nach Formel VII in Nr. 9 kann ein Bruch, dessen Zähler und Nenner einen gemeinsamen ganzzahligen Teiler haben, gleich demjenigen Bruche gesetzt werden, der entsteht, wenn man Zähler und Nenner durch diesen Teiler dividiert. Dieses Verfahren heisst *Heben* oder *Reduzieren* des Bruches. Das erststufige Analogon zum Heben der Brüche ist die Verminderung des Minuend und Subtrahend einer Differenz um eine und dieselbe ganze Zahl. Während aber bei diesem Verfahren jede beliebige ganze Zahl als Minuend und als Subtrahend aus jeder beliebigen Differenz ganzer Zahlen erzielt werden kann, kann durch Heben eines beliebigen Bruches nicht jede beliebige ganze Zahl als Zähler oder Nenner erzielt werden. Man

23) Die Unterscheidung von rationalen und irrationalen Grössen tritt bei den Griechen in geometrischem Gewande schon vor Euclid (um 300 v. Chr.) auf, zuerst wohl bei *Pythagoras* (um 500), der erkannte, dass die Hypotenuse eines gleichschenkelig-rechtwinkligen Dreiecks unsagbar (*ἄσφητος*) sei, wenn die Katheten sagbar sind. *Plato* (429—348) erkannte die Irrationalität bei der Diagonale des Quadrats über Fünf (*Plato's Staat*, VIII 546). Ausführlicher noch behandelte *Euclid* das Irrationale (*ἄλογον*) im 10. Buche seiner „*Elemente*“, und zwar in geometrischer Gestalt, indem unterschieden wird, ob zwei Strecken kommensurabel oder inkommensurabel (*ἀσύνμετροι*) sind. Archimedes (287—212) schloss bei seiner Berechnung der Zahl π die Quadratwurzel aus Drei und aus anderen Zahlen in sehr nahe rationale Grenzen ein. Über das Irrationale in neuerer Zeit vgl. hier I A 3.

muss sich damit begnügen, soweit zu heben, dass Zähler und Nenner keinen gemeinsamen Teiler mehr haben. Ist der Zähler eines Bruches ein Teiler des Nenners, so lässt sich durch Heben ein Bruch erzielen, dessen Zähler 1 ist. Solche Brüche mit dem Zähler 1 heissen *Stammbrüche*²¹⁾. Jeder beliebige Bruch kann als Produkt seines Zählers mit seinem Stammbruch aufgefasst werden, d. h. mit demjenigen Bruch, der denselben Nenner hat. Wenn $a > b$ ist und a und b ganzzahlig sind, so kann $a = m \cdot b + v$ gesetzt werden, wo m eine ganz bestimmte ganze Zahl und $v < b$ ist, woraus folgt, dass jeder Bruch um einen echten Bruch grösser als eine ganze Zahl ist, oder dass jede rationale Zahl in zwei Grenzen eingeschlossen¹⁹⁾ werden kann, die ganze Zahlen sind, sich um 1 unterscheiden, und von denen die eine grösser, die andere kleiner ist¹⁹⁾, als die rationale Zahl.

Durch Fortsetzung des Stellenwert-Princips, auf dem unsere Zifferschrift beruht, nach rechts gelangt man zu den *Dezimalbrüchen*²⁴⁾, d. h. Brüchen, von denen nur der Zähler geschrieben zu werden braucht, weil der Nenner zehn oder hundert oder tausend u. s. w. ist. Welche von diesen Zahlen als Nenner gemeint ist, deutet man durch die Stellung eines Komma's²⁴⁾ an. (Vgl. Numerisches Rechnen in I F.)

Die Einführung der relativen Zahlen verwandelt jede Subtraktion in eine Addition, und zwar durch Umkehrung eines Vorzeichens. Ebenso verwandelt die Einführung der gebrochenen Zahlen jede Division in eine Multiplikation. Versteht man nämlich unter *reziprotem Wert* eines Bruches den Bruch, dessen Zähler und Nenner Nenner und Zähler des ursprünglichen Bruches sind, so erkennt man, dass das Ergebnis der Division durch einen Bruch übereinstimmt mit dem Ergebnis der Multiplikation mit seinem reziproken Werte.

Die Arithmetik, welche nur die Operationen erster und zweiter Stufe umfasst, schliesst, wie aus dem Obigen hervorgeht, mit den beiden folgenden Endergebnissen ab:

24) Die *Dezimalbrüche* entstanden im Laufe des 16. Jahrhunderts. *Johann Keppler* (1571—1630) führte das Dezimalkomma ein. Das Princip, das der Dezimalbruch-Schreibweise zu grunde liegt, war schon im Altertum bei den *Sexagesimalbrüchen* verwendet. Bei denselben lässt man auf die Ganzen Vielfache von $\frac{1}{60}$ und dann von $\frac{1}{3600}$ folgen. Dass dieselben *babylonischen* Ursprungs sind, ist durch die Entdeckung einer von babylonischen Astronomen angewandten sexagesimalen Stellenwert-Zifferschrift (mit 59 verschiedenen Ziffern, aber ohne ein Zeichen für nichts) unzweifelhaft geworden. Auch die griechischen Astronomen (*Ptolemæus*, um 150 n. Chr.) rechneten mit Sexagesimalbrüchen. Z. B. setzte *Ptolemæus* $\pi = 3 \dots 8 \dots 30 = 3 + \frac{8}{60} + \frac{30}{3600}$. Unsere Sechzig-Teilung der Stunde und des Grades, sowie die Ausdrücke *Minute* (pars minuta prima) und *Secunde* (pars minuta secunda) sind Reste der alten Sexagesimalbrüche.

1) Wenn allgemeine Zahlzeichen (Buchstaben) in beliebiger Weise durch die Operationen erster und zweiter Stufe verbunden werden, so lässt sich das Ergebnis immer als Quotient darstellen, dessen Dividend und Divisor eine algebraische Summe von Produkten ist;

2) Wenn beliebig viele rationale Zahlen in irgend welcher Weise durch die Operationen erster und zweiter Stufe verbunden werden, so ist das Ergebnis immer eine rationale Zahl, falls eine Division durch Null nicht vorkommt.

Neue Erweiterungen des Zahlgebietes werden erst notwendig, wenn man die bisher definierten Zahlen durch die Operationen dritter Stufe miteinander verknüpft. (Vgl. Nr. 11 sowie I A 3 und I A 4.)

11. Die drei Operationen dritter Stufe. In Nr. 7 ist die Definition des Produktes dahin erweitert, dass es beliebig viele Faktoren enthalten darf. Der Fall, dass diese alle gleich sind, führt zur direkten Operation dritter Stufe, der *Potenzierung*²⁵⁾. Eine Zahl a (passiv) mit einer Zahl p (activ) potenzieren, heisst also, ein Produkt von p Faktoren bilden, von denen jeder a heisst. Die Zahl a , welche als Faktor eines Productes gesetzt wird, heisst *Basis*, die Zahl p , welche angiebt, wie oft die andere Zahl a als Faktor eines Produktes gesetzt werden soll, heisst *Exponent*²⁶⁾. Das Resultat der Potenzierung, das man a^p schreibt und „ a hoch p “ liest, heisst *Potenz*. Insofern man a als Produkt von einem Faktor auffasst, setzt man $a^1 = a$. Durch die Definition der Potenzierung ergeben sich

25) Potenzen mit den Exponenten 1 bis 6 bezeichnete schon Diophant in abgekürzter Weise. Er nennt die zweite Potenz *déraqis*, ein Wort, auf das durch die lateinische Übersetzung *potentia* das Wort „Potenz“ zurückzuführen ist. Im 14. bis 16. Jahrhundert finden sich schon Spuren eines Rechnens mit Potenzen und Wurzeln, so bei *Oresme* († 1382), *Adam Riese* († 1559), *Christoff Rudolf* (um 1530) und namentlich bei *Michael Stifel* in dessen *Arithmetica integra* (Nürnberg 1544). Näheres hierüber in *M. Cantor's Geschichte der Mathematik*. Aber erst die Erfindung der Logarithmen am Anfange des 17. Jahrhunderts verschaffte den Operationen dritter Stufe ein volles Bürgerrecht in der Arithmetik. Die tiefere Erkenntnis ihres Zusammenhanges gehört jedoch einer noch späteren Zeit an. Die Erfinder der Logarithmen sind *Jos. Bürgi* († 1632) und *John Napier* († 1617). Um die Verbreitung der Kenntnis der Logarithmen hat auch *Kepler* († 1630) grosse Verdienste. *Henry Briggs* († 1630) führte die Basis zehn ein und gab eine Sammlung von Logarithmen dieser Basis heraus. (Vgl. Numerisches Rechnen, I F.) Das Wort Logarithmus (*λόγος ἀριθμός* = Nummer eines Verhältnisses) erklärt sich dadurch, dass man zwei Verhältnisse dadurch in Beziehung zu setzen suchte, dass man das eine potenzierte, um das andere zu erhalten. So nannte man 8 zu 27 das dritte Verhältnis von 2 zu 3. Auch kommt für Logarithmus der Ausdruck „numerus rationem exponens“ vor, von dem vielleicht das Wort „Exponent“ herrührt.

aus den Gesetzen der Multiplikation die folgenden Gesetze der Potenzierung:

- | | | |
|------|---|---|
| I. | $a^p \cdot a^q = a^{p+q};$ | } (Distributionsformeln bei gleicher Basis.) |
| IIa. | $a^p : a^q = a^{p-q},$ falls $p > q$ ist; | |
| IIb. | $a^p : a^q = 1,$ falls $p = q$ ist; | |
| IIc. | $a^p : a^q = 1 : a^{q-p},$ falls $p < q$ ist; | |
| III. | $a^q \cdot b^q = (a \cdot b)^q;$ | } (Distributionsformeln bei gleichem Exponenten.) |
| IV. | $a^q : b^q = (a : b)^q;$ | |
| V. | $(a^p)^q = a^{p \cdot q} = (a^q)^p;$ | (Associationsformel.) |

Nach der Definition der Potenzierung kann die Basis jede beliebige Zahl sein; der Exponent muss jedoch ein Ergebnis des Zählens, also eine positive ganze Zahl sein. Für „positiv-ganz“ sagt man auch „*natürlich*“; demnach heisst eine Potenz mit einem derartigen Exponenten eine „*natürliche*“.

Wegen einer geometrischen Anwendung heissen Potenzen mit dem Exponenten 2 auch Quadrate, mit dem Exponenten 3 auch Kuben.

Ist die Basis eine Summe, eine Differenz, ein Produkt, ein Quotient oder eine Potenz, so ist dieselbe in eine Klammer einzuschliessen. Dagegen macht die höhere Stellung des Exponenten eine Klammer um denselben überflüssig.

Nach der Definition der Potenzierung sind a^0 und a^{-n} , wo $-n$ eine negative ganze Zahl ist, zunächst sinnlose Zeichen. Auch Produkte, deren Multiplikator null oder negativ ist, waren, nach der ursprünglichen Definition der Multiplikation, sinnlose Zeichen. Doch erhielten solche Zeichen, gemäss dem Princip der Permanenz, dadurch Sinn, dass man wünschte, mit solchen Differenzen ebenso multiplizieren zu können, wie mit Differenzen, die eine positive Zahl darstellen. In derselben Weise verfährt man mit den Potenzformen

$$a^0 \text{ und } a^{-n}.$$

Man setzt also $a^0 = a^{n-p}$, hebt die Beschränkung $p > q$ in Formel IIa auf, und wendet dieselbe, umgekehrt gelesen, an. Dann kommt:

$$a^0 = a^{n-p} = a^p : a^p = 1.$$

Ebenso setzt man $a^{-n} = a^{p-(p+n)}$, hebt die Beschränkung $p > q$ in Formel IIa auf, findet dadurch $a^p : a^{p+n}$, wendet nun Formel IIc an und erhält $1 : a^n$.

Die Ausdehnung des Begriffs der Potenzierung auf den Fall, dass der Exponent eine gebrochene Zahl ist, lässt sich erst bewerkstelligen, nachdem die Gesetze der Radizierung, der einen der beiden Umkehrungen der Potenzierung, festgestellt sind.

Da bei der Potenzierung das Kommutationsgesetz nicht gilt, weil im allgemeinen b^n nicht gleich n^b ist, so müssen die beiden Umkehrungen der Potenzierung nicht bloss logisch, sondern auch *arithmetisch unterschieden* werden. Die Operation, welche bei $b^a = a$ die Basis, also die passive Zahl, als gesucht, a und n aber als gegeben betrachtet, heisst *Radizierung*²⁵⁾; die Operation, welche bei $b^n = a$ den Exponenten, also die aktive Zahl, als gesucht, b und a aber als gegeben betrachtet, heisst *Logarithmierung*²⁵⁾.

„ n^{te} Wurzel aus a “, geschrieben: $\sqrt[n]{a}$,²⁵⁾ ist also die Zahl, welche mit n potenziert, a ergibt. Demnach ist $(\sqrt[n]{a})^n = a$ die Definitionsformel der Radizierung. Die Zahl, welche ursprünglich Potenz war, heisst bei der Radizierung *Radikand*, die Zahl, welche Potenz-Exponent war, heisst *Wurzel-Exponent* und die Zahl, welche Basis war, heisst *Wurzel*. Durch die Definition der Radizierung ergeben sich aus den Gesetzen der Potenzierung die folgenden Gesetze der Radizierung:

- $$\begin{array}{l} \text{I. } \sqrt[n]{a} \cdot \sqrt[n]{b} = \sqrt[n]{a \cdot b}; \\ \text{II. } \sqrt[n]{a} : \sqrt[n]{b} = \sqrt[n]{a : b}; \\ \text{III. } \sqrt[p]{a^q} = (\sqrt[p]{a})^q; \\ \text{IV. } \sqrt[p]{\sqrt[q]{a}} = \sqrt[p \cdot q]{a} = \sqrt[p]{\sqrt[q]{a}}; \\ \text{V. } \sqrt[p]{a^{nq}} = \sqrt[p]{a^n}. \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{(Distributive Formeln.)} \\ \\ \text{(Associative Formeln.)} \end{array}$$

Durch die Radizierung lassen sich Potenzen mit *gebrochenen Exponenten* definieren. Da $\frac{p}{q} \cdot q = p$ die Definitionsformel der gebrochenen Zahl $\frac{p}{q}$ ist, und da $a^{\frac{p}{q} \cdot q}$ gleich $(a^{\frac{p}{q}})^q$ ist, so ist unter $a^{\frac{p}{q}}$ eine Zahl zu verstehen, die, mit q potenziert, a^p ergibt, und dies ist $\sqrt[q]{a^p}$. Ebenso erkennt man, dass $a^{-\frac{p}{q}} = 1 : \sqrt[q]{a^p}$ ist. Ferner ergibt Formel V, wie $\sqrt[n]{a}$, wo n eine positive oder negative gebrochene Zahl ist, als Potenz dargestellt werden kann, deren Basis a ist und deren Exponent rational ist. Jede Wurzel lässt sich also als Potenz darstellen, deren Basis der Radikand der Wurzel ist, gerade so wie jeder Quotient sich als Produkt darstellen lässt, dessen Multiplikand der Dividend des Quotienten ist.

Wenn a eine beliebige rationale Zahl und n eine ganze Zahl ist, so stellt a^n eine rationale Zahl dar. Wenn aber bei rationalem a die Zahl n zwar rational, aber nicht ganzzahlig ist, so giebt es nur dann

eine rationale Zahl, die gleich a^n gesetzt werden darf, wenn a die q^{te} Potenz einer rationalen Zahl ist, wo q der Nenner der Zahl n ist. In allen anderen Fällen stellt a^n , wo n nicht ganzzahlig ist, eine Zeichen-Verknüpfung dar, der erst noch Sinn zu erteilen ist. (Vgl. I A 3 und I A 4.)

„*Logarithmus von a zur Basis b* “²⁵), geschrieben: $\log^b a$, ist der Exponent, mit welchem b potenziert werden muss, damit sich a ergibt. Demnach ist:

$$b^{\log^b a} = a$$

die Definitionsformel der *Logarithmierung*. Die Zahl, welche ursprünglich Potenz war, heisst bei der Logarithmierung *Logarithmand*, die Zahl, welche Basis war, heisst *Logarithmen-Basis*, und die Zahl, welche Exponent war, heisst *Logarithmus*. Durch die Definition der Logarithmierung ergeben sich aus den Gesetzen der Potenzierung die folgenden Gesetze der Logarithmierung:

- I. $\log^b (p \cdot q) = \log^b p + \log^b q$;
- II. $\log^b (p : q) = \log^b p - \log^b q$;
- III. $\log^b (p^m) = m \cdot \log^b p$;
- IV. $\log^b a = \frac{\log^c a}{\log^c b}$.

Wenn b eine beliebige rationale Zahl ist, so stellt $\log^b a$ nur dann eine rationale Zahl dar, wenn a gleich einer Potenz ist, deren Basis b ist, und deren Exponent eine rationale Zahl ist. [Dies ist z. B. der Fall, wenn $b = \frac{9}{4}$ und $a = \frac{8}{27}$ ist. Denn $(\frac{9}{4})^{-\frac{3}{2}} = (\frac{9}{4})^{+\frac{3}{2}} = (\sqrt[2]{\frac{9}{4}})^3 = (\frac{3}{2})^3 = \frac{8}{27}$. Daher ist $\log_{\frac{9}{4}} \frac{8}{27}$ gleich der rationalen Zahl $-\frac{3}{2}$.] In allen sonstigen Fällen stellt $\log^b a$ eine Zeichen-Verknüpfung dar, der erst noch Sinn zu erteilen ist. (Vgl. I A 3 und I A 4.)

In der folgenden Tabelle der arithmetischen Operationen ist immer 16 als passive, 2 als aktive Zahl betrachtet.

Tabelle der 7 Operationen.

Name der Operation:	Beispiel:	Die passive Zahl, hier 16, heisst:	Die aktive Zahl, hier 2, heisst:	Das Resultat heisst:
Addition	$16 + 2 = 18$	Augend (Summand)	Auctor (Summand)	Summe
Subtraktion	$16 - 2 = 14$	Minuend	Subtrahend	Differenz
Multiplikation	$16 \cdot 2 = 32$	Multiplikand (Faktor)	Multiplikator (Faktor)	Produkt
Division	$16 : 2 = 8$	Dividend	Divisor	Quotient
Potenzierung	$16^2 = 256$	Basis	Exponent	Potenz
Radizierung	$\sqrt[2]{16} = 4$	Radikand	Wurzel- Exponent	Wurzel
Logarithmierung	$\log_2 16 = 4$	Logarithmand	Logarithmen- Basis	Logarithmus

Wie hierbei aus jeder der drei direkten Operationen Addition, Multiplikation, Potenzierung ihre beiden Umkehrungen folgen, zeigt folgende Tabelle:

Stufe:	Direkte Operation:	Indirekte Operation:	Gesucht wird:
I.	Addition: $5 + 3 = 8$	Subtraktion: $8 - 3 = 5$	Augend
		Subtraktion: $8 - 5 = 3$	Auctor
II.	Multiplikation: $5 \cdot 3 = 15$	Division: $15 : 3 = 5$	Multiplikand
		Division: $15 : 5 = 3$	Multiplikator
III.	Potenzierung: $5^3 = 125$	Radizierung: $\sqrt[3]{125} = 5$	Basis
		Logarithm.: $\log_5 125 = 3$	Exponent

In derselben Weise, wie die Multiplikation aus der Addition, die Potenzierung aus der Multiplikation hervorgeht, so könnte man auch aus der Potenzierung als der direkten Operation dritter Stufe eine direkte *Operation vierter Stufe*²⁶⁾, aus dieser eine fünfter Stufe u. s. w.

26) Von Abhandlungen, die sich auf Operationen vierter oder höherer Stufe beziehen, seien hier erwähnt: die von *H. Gerluck* in der Zeitschr. f. math. nat. Unterr. Jahrg. 13, Heft 6, von *F. Wöpcke* in J. f. Mat. 42, von *E. Schultze*

ableiten. Doch ist schon die Definition einer direkten Operation vierter Stufe zwar logisch berechtigt, aber unwichtig, weil bereits bei der dritten Stufe das Kommutationsgesetz seine Gültigkeit verliert. Um zu einer direkten Operation vierter Stufe zu gelangen, hat man a^a als Exponenten von a zu betrachten, die so entstandene Potenz wieder als Exponenten von a zu betrachten und so fortzufahren, bis a b mal gesetzt ist. Nennt man das Ergebnis dann $(a; b)$, so stellt $(a; b)$ das Resultat der direkten Operation vierter Stufe dar. Für dieselbe gilt z. B.: $(a; b)^{(a; c)} = (a; c + 1)^{(a; b-1)}$.

in Arch. f. Math. (2) III (1886). *G. Eisenstein* untersuchte durch Reihen-Entwickelungen die Funktion $x = y^{\frac{1}{y}}$ als Umkehrung von $y = (x; \infty)$ in J. f. Math. Bd. 28. Die Lehrbücher von *Hankel*, *Grassmann*, *H. Scheffler*, *E. Schröder*, *O. Schloemilch*, *Schubert* erwähnen die direkte Operation vierter Stufe, ohne näher darauf einzugehen.

I A 2. KOMBINATORIK

VON

E. NETTO

IN GIESSEN.

Inhaltsübersicht.

1. Kombinatorik; historische Würdigung.
2. Kombinatorische Operationen. Definitionen.
3. Inversion; Transposition.
4. Permutationen mit beschränkter Stellenbesetzung.
5. Verwandte Permutationen.
6. Sequenzen.
7. Anwendung auf Fragen der Arithmetik.
8. Kombinationen zu bestimmter Summe oder bestimmtem Produkte.
9. Kombinationen mit beschränkter Stellenbesetzung.
10. Tripelsysteme.
11. Ausdehnung des Begriffs der Variation.
12. Formeln.
13. Binomialcoefficienten.
14. Anwendungen.
15. Determinanten. Erklärung des Begriffs.
16. Definitionen.
17. Anzahl-Probleme hinsichtlich der Glieder.
18. Elementare Eigenschaften.
19. *Laplace'sche* und andere Zerlegungssätze.
20. Entwicklungen.
21. Komposition und Produkt.
22. Andere Art von Komposition.
23. Zusammengesetzte Determinanten.
24. Rang der Determinante.
25. Relationen zwischen coaxialen Subdeterminanten.
26. Symmetrische Determinanten.
27. Recurrierende Determinanten. Circulanten.
28. Halbsymmetrische Determinanten.
29. Schiefe Determinanten.
30. Centrosymmetrische Determinanten.
31. Weitere Determinantenbildungen.
32. Determinanten höheren Ranges.
33. Unendliche Determinanten.
34. Matrizen.

Die Monographien sind in Nr. 1 und Nr. 35 angegeben.

1. Kombinatorik; historische Würdigung. Die *Kombinatorik* hat sich weder in ihren elementaren noch in ihren höheren analytischen Gebieten so entwickelt, wie dies zu Beginn des Jahrhunderts in überschwänglicher Weise von den Vertretern der „kombinatorischen Schule“ erhofft wurde. Anfänge der Kombinatorik lassen sich weit zurück verfolgen; als Zweig der Wissenschaft darf sie erst von *Bl. Pascal*¹⁾, *G. W. Leibnitz*²⁾, *J. Wallis*³⁾, besonders aber von *Jac. Bernoulli I.* und *A. de Moivre*⁴⁾ an gelten. Die Grundzüge der elementaren Teile sind in jedes Lehrbuch übergegangen; die analytischen Anwendungen treten sehr zurück. So stammen die umfassenderen Monographien sämtlich aus früherer Zeit⁵⁾, und tiefer eindringende Abhandlungen sind nur in geringer Zahl vorhanden⁶⁾.

2. Kombinatorische Operationen. Definitionen. Von den unendlich vielen möglichen kombinatorischen Operationen haben drei als gleichberechtigt (trotz logischer Bedenken) hauptsächliche Geltung erlangt, die Permutationen (P.), die Kombinationen⁷⁾ (K.) und die Variationen (V.). Jede Anordnung von n Elementen nennen wir eine Komplexion (Kp.) derselben. — P. von n Elementen heißen die Kp., welche alle gegebenen Elemente in allen möglichen Aufeinanderfolgen liefern. Sind die Elemente von einander verschieden, dann gibt es $n!$, kommen unter ihnen a gleiche einer Art, b gleiche einer andern Art u. s. w. vor, dann gibt es $n! : (a! b! \dots)$.

K. von n Elementen zur k^{ten} Klasse sind alle Kp. von je k jener n Elemente ohne Berücksichtigung der Anordnung; darf jedes Element nur einmal aufgenommen werden, dann sind es K. ohne Wiederholung (o. W.), sonst mit Wiederholung (m. W.). Es gibt in k^{ter} Klasse

$$\text{K. o. W. } \frac{n!}{k!(n-k)!}, \quad \text{K. m. W. } \frac{(n+k-1)!}{k!(n-1)!}.$$

1) *Traité du triangle arithmétique*. Paris 1665, geschrieb. 1664 (Op. posth.).

2) *Dissertatio de arte Combinatoria*. Lipsiae 1668. Opp. II, T. I, p. 339.

3) *Treatise of algebra*. Lond. 1673 und 1685.

4) *Bernoulli*, *Ars conjectandi*. Basil. 1713 (Op. posth.). — *Moivre*, *Probabilities*. Lond. 1718.

5) *K. F. Hindenburg*, *Nov. Syst. Permutationum etc.* Lips. 1781. — *J. Weingärtner*, *Lehrb. d. combinator. Analysis*. Leipz. 1800. — *Kar. Stahl*, *Grundriss d. Komb.-Lehre*. Jena 1800. — *Bernh. Thibaut*, *Grundr. d. allgem. Arithm. od. Analysis*. Götting. 1809. — *Chr. Kramp*, *Élem. d'Arithm.* Cologne 1808. — *F. W. Spehr*, *Lehrbegr. d. rein. Komb.-Lehre*. Braunsch. 1824. — *A. v. Ettingshausen*, *D. kombinat. Analysis*. Wien 1826. — *J. Öttinger*, *Lehre v. d. Kombinat.* Freiburg 1837.

6) *Hessel*, *Arch. f. Math.* 7 (1845), p. 395. — *Öttinger*, *ib.* 15 (1850), p. 241.

7) *Hindenburg* schreibt auch „Komplexionen“; diese zerfallen in eigentliche Kombinationen, in Konternationen, Konquaternationen u. s. w.

V. entstehen, wenn man in den K. die Elemente permutiert. Es gibt in k^{ter} Klasse

$$\text{V. o. W. } \frac{n!}{(n-k)!}, \quad \text{V. m. W. } n^k.$$

3. Inversion; Transposition. Da die Elemente nur insofern gelten, als sie identisch oder verschieden sind, so kann ihre Bezeichnung beliebig z. B. durch Ziffern 1, 2, 3, ... oder durch Buchstaben a, b, c, \dots bewirkt werden. Dadurch kommt ein neues Agens in die Betrachtung, welches nun nach verschiedenen Richtungen hin benützt werden kann. Eine Kp. heisst *gut geordnet*, wenn stets die höhere Ziffer (der alphabetisch spätere Buchstabe) hinter der niederen (dem früheren) steht. Jede Abweichung davon heisst *Inversion*⁸⁾. Für die Abzählung der Inversionenzahl bei umfangreichen Kp. giebt *P. Gordan* eine Regel⁹⁾. Eine Kp. verschiedener Elemente gehört zur *ersten* oder *zweiten* Klasse (ist *gerade* oder *ungerade*), je nachdem sie eine gerade oder ungerade Anzahl von Inversionen enthält¹⁰⁾. Durch eine *Transposition*, d. h. Umstellung zweier Elemente, wird die Klasse geändert¹¹⁾.

4. Permutationen mit beschränkter Stellenbesetzung. P. mit *beschränkter Stellenbesetzung* sind solche, bei denen entweder eine vorgeschriebene Anzahl von Elementen ihre Plätze beibehält, oder bei denen gewisse Stellen nur von gewissen Elementen eingenommen werden dürfen.

*L. Euler*¹²⁾ führt eine Funktion $f(n)$ ein, welche die Zahl der P. giebt, bei denen jedes Element den ursprünglichen Platz ändert. Hiermit in Verbindung steht ein $F(n, m)$, welches angiebt, bei wievielen P. von n Elementen genau m ihren Platz behalten¹³⁾. Es ist

8) *G. Cramer*, *Introduct. à l'Analyse des lignes courbes* (1750); Genève. Appendice p. 658. — *T. P. Kirkman*, *Cambr. a. Dubl. J.* 2 (1847), p. 191.

9) *Vorles. üb. Invarianten-Theor.*, herausgeg. v. *G. Kerschesteiner* (1885), Leipz. I, p. 2.

10) *E. Bézout*, *Mém. Paris* (1764), p. 292. — *A. L. Cauchy*, *J. d. l'Éc. pol. cah.* 10 (1815), p. 41. — *K. G. Jacobi*, *Werke* 3, p. 359 = *J. f. M.* 22 (1841), p. 285.

11) *P. S. Laplace*, *Mém. Paris* (1772), p. 294.

12) *Mém. Pétersb.* 3 (1809), p. 57. — *Öttinger*, *Lehre v. d. Kombin.* Freiburg 1837. — *M. Cantor*, *Z. f. Math.* 2 (1857), p. 65. — *R. Baltzer*, *Leipz. Ber.* (1873), p. 534. — *S. Kantor*, *Z. f. Math.* 15 (1870), p. 361. — *A. Cayley*, *Edinb. Proceed.* 9 (1878), p. 338 u. 388.

13) *M. Cantor*, *Z. f. Math.* 2 (1857), p. 410. — *J. J. Weyrauch*, *J. f. Math.* 74 (1872), p. 273.

$$f(n) = nf(n-1) + (-1)^n = (n-1)[f(n-1) + f(n-2)];$$

$$f(0) = 1, \quad f(1) = 0.$$

$$F(n, m) = \binom{n}{m} f(n-m).$$

Eine andere Beschränkung der Stellenbesetzung ist die, dass gewisse Stellen nur von gewissen Elementen eingenommen werden dürfen¹⁴), z. B. die geraden Stellen nur von geraden Zahlen¹⁵); oder, falls gleiche Elemente vorkommen, dass nicht zwei solche aufeinander folgen¹⁶).

Auch darin liegen Beschränkungen der Stellenbesetzung, dass die P. selbst in verschiedene Anordnungen treten, z. B. so dass n P. von n Elementen so untereinander gesetzt werden sollen, dass in keiner Spalte gleiche Elemente vorkommen¹⁷) (lateinisches Quadrat).

5. Verwandte Permutationen. *Verwandte Permutationen* sind nach *H. A. Rothe*¹⁸) zwei P. dann, wenn die Stellenordnung und das Stellelement (als Zahl) der einen gegen die der anderen vertauscht sind; es wird zu bestimmen sein, wie viele P. sich selbst verwandt sind¹⁹). *P. A. Mac-Mahon* giebt Erweiterungen dieser Begriffe¹⁹).

6. Sequenzen. *D. André* hat den Begriff der *Sequenz* bei P. eingeführt und in einer ganzen Reihe von Abhandlungen durchforscht²⁰). Aufeinanderfolgende Zahlenelemente einer P. bilden eine Sequenz, wenn jedes folgende größer (kleiner) als das vorhergehende ist. Jede P. zerfällt in Sequenzen. Die Anzahl der vorkommenden Sequenzen bestimmt die „Art“ der P. Es wird untersucht, wieviele P. einer bestimmten Art angehören. Es zeigt sich, dass die Anzahl der P. mit gerader Sequenzzahl gleich derjenigen der P. mit ungerader Sequenzzahl ist. Es werden geometrische Repräsentationen gegeben, u. s. w.

14) *C. W. Baur*, Z. f. Math. 2 (1857), p. 267.

15) *A. Laisant*, C. R. 112 (1891), p. 1047.

16) *O. Terquem*, J. d. Math. 4 (1839), p. 177. — Weitere Einschränkungen in der Stellenbesetzung untersucht *Th. Muir*, Edinb. Proceed. 10 (1881), p. 187. *A. Holtze*, Arch. f. Math. (2), 11 (1892), p. 284.

17) *A. Cayley*, Messenger (2), 19 (1890), p. 135. *M. Frolov*, J. m. spéc. (3), 4 (1890), p. 8 u. 25. *J. Bourget*, J. de Math. (3), 8 (1882), p. 413. *P. Seelhof*, Arch. f. Math. (2), 1 (1884), p. 97.

18) *Hindenb.* Arch. f. M. (1795).

19) *P. A. Mac Mahon*, Messeng. (2), 24 (1894), p. 69.

20) C. R. 97 (1883), p. 1356; 115 (1892), p. 872; 118 (1894), p. 575. [*G. Darboux* Rapport; C. R. 118 (1894), p. 1026]. Soc. m. d. Fr. 21 (1893), p. 131; Ann. Éc. Norm. (3), 1 (1884), p. 121.

7. Anwendung auf Fragen der Arithmetik. Im Zusammenhang mit den P.-Theoremen stehen die Fragen, auf wie viele Arten man Summen oder Produkte gegebener Elemente, die verschieden oder zum Teil einander auch gleich sind, mit oder ohne Umstellung dieser Elemente, rechnerisch durchführen könne²¹⁾.

8. Kombinationen zu bestimmter Summe oder bestimmtem Produkte. Auch bei den K. und V. können die einzelnen Kp. Beschränkungen unterworfen werden. Die bekannteste und wichtigste besteht darin, daß die K. und V. der natürlichen Zahlen betrachtet werden, deren Elemente m. W. oder o. W. eine *bestimmte Summe* haben, welche das *Gewicht* der Kp. genannt wird. Ihre Bedeutung tritt in der Invariantentheorie zu Tage. *L. Euler* war der Erste, welcher diese Frage behandelte (Introductio in Anal. Lausanne 1748, § 209 ff. Comm. Acad. Petr. 3 [1753], p. 159), der für die Anzahl dieser K. Entwicklungscoefficienten gewisser Produkte gab und dadurch zu Beziehungen zwischen K. m. W. und K. o. W. gelangte. Diese Fragen wurden später vielfach weiter verfolgt²²⁾, und ihre Beantwortung besonders von *Cayley*²³⁾ und *J. J. Sylvester*²⁴⁾ durch Aufstellung von Tabellen und geometrische Repräsentationen gefördert. *Mac Mahon* hat diese Untersuchungen weitergeführt, die dann auch auf die Zerlegung von Zahlenpaaren ausgedehnt wurden. Wir müssen uns mit diesen Bemerkungen begnügen, da die weiteren Anwendungen auf symmetrische Funktionen und die Invariantentheorie nicht mehr kombinatorischer Natur sind.

In ähnlicher Weise hat *Möbius* die K. behandelt, bei denen die Elemente der Kp. ein *bestimmtes Produkt* besitzen. Sie werden nach ihren Klassen geordnet, und die Anzahlen der zugehörigen K. mit einander in Verbindung gebracht. Derartige Beziehungen treten auch für den Fall auf, daß den Kp. noch Bedingungen auferlegt werden, z. B. daß bei dem vorgeschriebenen Produkte *a* *b* in jeder Kp. jedes Element mindestens einen Faktor *b* hat.

Ettingshausen ist ferner darauf eingegangen, jede Kp. als Produkt

21) *E. Ch. Catalan*, J. d. Math. 6 (1874), p. 71. — *F. Schlegel*, Z. f. Math. 15 (1870), p. 361.

22) *M. Stern*, J. f. M. 21 (1840), p. 91 u. p. 177. — *Id.* ibid. 1845, p. 102. — *C. Wasmund*, Arch. f. Math. 21 (1853), p. 228, ibid. 34 (1860), p. 140.

23) Lond. Transact. 145 (1855), p. 127. — *Id.* ibid. 146 (1856), p. 17. — Amer. J. 6 (1883), p. 63.

24) Quart. J. 1 (1855—57), p. 81 u. p. 141. — Amer. J. 5 (1882), p. 264. — *C. R.* 96 (1883). Vgl. auch *Mac Mahon*, Lond. Trans. 184 (1894), p. 800. — Vgl. den Bericht über Combin. Analysis: Lond. M. S. Pr. 28 (1896), p. 10.

25) J. f. M. 9 (1832); 105.

aufzufassen, und alle solche zu einer K.-Klasse gehörigen Produkte zu summieren²⁶). Weiter werden die Klassen nach bestimmten Moduln eingeteilt und Zahlenbeziehungen zwischen ihnen ermittelt²⁷).

Und nicht nur auf die K. selbst beziehen sich solche Untersuchungen, sondern auch auf Kp., die in verschiedenartiger Weise aus den gewöhnlichen K. abgeleitet sind. Es wird z. B. zum ersten Elemente jeder Kp. 0 addiert, zum zweiten 1, ... zum n^{ten} ($n-1$). So entstehen Produkte, zwischen deren Summen wieder merkwürdige Beziehungen sich angeben lassen²⁸). Vgl. auch *Th. B. Sprague*, Edinb. Proc. 37 (1893), p. 399.

9. Kombinationen mit beschränkter Stellenbesetzung. Der Weg der Untersuchung, welcher sich auf *beschränkte Stellenbesetzung* bezieht, gliedert sich hier. Zunächst werden, ähnlich wie bei den P., Forderungen gestellt, dass gewisse Elemente in einer vorgeschriebenen Anzahl von Malen vorkommen²⁹), oder dass eine Maximalzahl für ihr Auftreten gegeben ist³⁰).

10. Tripelsysteme. Eine andere Richtung aber hat sich für die Geometrie, die Wahrscheinlichkeitsrechnung, für die Algebra als besonders wichtig herausgestellt. Unabhängig von einander stellten *T. P. Kirkman*³¹) und *J. Steiner*³²) fast identische Aufgaben; der Erste sein „Schulmädchen-Problem“: Fünfzehn Mädchen werden 35mal ausgeführt in Reihen zu je 3, so dass nicht 2 zweimal zusammen gehen; der Letzte das folgende: Aus N Elementen sollen K. der 3^{ten} Klasse (Ternen) so ausgewählt werden, dass jede Ambe ein- und nur einmal vorkommt; ferner K. der 4^{ten} Klasse (Quaternen) so, dass in ihnen jede Terne, die unter den vorigen nicht auftrat, ein- und nur einmal vorkommt u. s. w. *Cayley*³³) und *R. R. Anstice*³⁴) behandelten einzelne Fälle der „Tripelsysteme“. Eine allgemeine Regel für die Bildung solcher Systeme, welche $N=6n+1$, $6n+3$ fordern, gab *M. Reiss*³⁵).

26) Die kombinatorische Analysis. Wien (1826).

27) *A. A. Cournot*, Bull. sci. m. (1829). *Ch. Ramus*, J. f. M. 11 (1834), p. 353.

28) *H. F. Scherk*, J. f. M. 3 (1828), p. 96; J. f. M. 4 (1829), p. 226.

29) *Ad. Weiss*, J. f. M. 34 (1847), p. 255.

30) *Öttinger*, Arch. f. M. 15 (1850), p. 241. *Baur*, Z. f. M. 2 (1857), p. 267. *Scherk*, Math. Abhandl. Berlin (1825), p. 67. *André*, Ann. Éc. norm. (2), 5 (1876), p. 155.

31) Cambr. a. Dubl. m. J. 7 (1852), p. 527 u. 8 (1853), p. 38; vgl. *T. Clausen*, Arch. f. M. 21 (1853), p. 93.

32) J. f. M. 45 (1853), p. 181 = Werke II, p. 435.

33) Phil. Mag. (3), 37 (1850), p. 50. — Ibid. (4), 25 (1862), p. 59.

34) Cambr. a. Dubl. m. J. 7 (1852), p. 279 u. 8 (1853), p. 149.

35) J. f. M. 56 (1859), p. 326.

In neuerer Zeit wurden analytische Darstellungen für Primzahlen $6n + 1$ hergeleitet, ferner für Zahlen $6n + 3$, falls dies das Dreifache einer Primzahl von der Form $6k + 5$ ist, u. s. w. Endlich wurden analytische Bildungsregeln gegeben, aus denen die Konstruktion für jedes mögliche N folgt³⁶⁾. Für $N = 13$ sind zwei Tripelsysteme bekannt³⁷⁾. Die weiteren Teile der *Steiner'schen* Aufgabe sind noch nicht in Angriff genommen. — Auf ähnliche Aufgaben macht *Cayley* aufmerksam³⁸⁾. Vgl. IA 6 Nr. 13 Anm. 67.

11. Ausdehnung des Begriffs der Variation. Der Begriff der V. ist nach der Richtung hin erweitert worden, dass m Reihen von je n Elementen gegeben sind, und als V. m^{ter} Klasse werden dann die Kp. bezeichnet, welche je ein Element aus jeder der m Reihen enthalten. Darf derselbe Stellenzeiger der Elemente nur einmal auftreten, so sind es V. o. W., sonst V. m. W.

12. Formeln. Zwischen den verschiedenen bisher besprochenen Anzahlen bei P., K. und V. giebt es eine ausserordentlich grosse Menge verknüpfender Formeln. Hier muss es ausreichen, auf die hauptsächlichsten Schriftsteller hinzuweisen, welche sich mit der Ableitung oder Zusammenstellung beschäftigt haben³⁹⁾.

13. Binomialkoeffizienten. Wir haben schon erwähnt, dass die Beweise des *binomischen* und des *polynomischen* Satzes für ganze positive Exponenten n

$$(z_1 + z_2 + \dots + z_v)^n = \sum \frac{n!}{x_1! x_2! \dots x_v!} z_1^{x_1} z_2^{x_2} \dots z_v^{x_v}$$

$$(x_1 + x_2 + \dots + x_v = n)$$

Anwendungen kombinatorischer Formeln sind. Die binomische Formel findet sich zuerst bei *H. Briggs*⁴⁰⁾, dann bei *J. Newton*⁴¹⁾; die Koeffi-

36) *E. Netto*, Substit.-Theorie § 192ff. Leipz. (1882). Math. Ann. 42 (1892), p. 143. *E. H. Moore*, Math. Ann. 43 (1893), p. 271; N. Y. Bull. 2, 4 (1897), p. 11. *L. Heffter*, Math. Ann. 49 (1897), p. 101. *J. de Vuca*, Rend. Palermo 8 (1894).

37) *K. Zulauf*, Dissert. Giessen (1897).

38) Phil. Mag. 30 (1865), p. 370.

39) *Hindenburg*, Nov. Syst. Permutationum, Combin. etc. primae lineae. Lips. (1781). — D. polynom. Lehrs., d. wichtigste Theorem d. ganzen Analysis, neu bearb. v. *J. N. Tetens*, *G. S. Klügel*, *A. Krauss*, *J. F. Pfaff* u. *Hindenburg*, herausgeg. v. *Hindenburg*. Leipz. 1796. *Hindenburg*, Institutionum dignitatum historia, leges etc. Vgl. auch *J. A. Grunert*, Arch. f. M. 1 (1841), p. 67; *Briançon*, J. d. l'Ec. Polyt. t. 15 (1837), p. 159.

40) Arithmetica Logarithmica. London (1620).

41) Briefe an *Oldenburg* (1676) 13. Juni u. 24. Oktober.

cienten der binomischen Entwicklung ($n = 2$), die *Binomialkoeffizienten* in ihrer Anordnung etc. als „arithmetisches Dreieck“

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & & 1 & & & \\
 & & 1 & & 1 & & \\
 & 1 & & 2 & & 1 & \\
 1 & & 3 & & 3 & & 1 \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot
 \end{array}$$

kommen schon bei *Bl. Pascal* vor⁴²⁾.

Als Erweiterungen des binomischen Satzes ist zu erwähnen, erstens die Entwicklung von $a(a+b)(a+2b)\dots(a+nb)$ nach Potenzen von a ; ⁴³⁾ ferner die Entwicklung

$$(x+a)^n = x^n + c_1(x+t_1)^{n-1} + c_2(x+t_1+t_2)^{n-2} + \dots,$$

wobei die t_α willkürliche Grössen sind⁴⁴⁾.

Als Erweiterung der Binomialkoeffizienten sind Ausdrücke der Form

$$[n(n+k)(n+2k)\dots(n+(p-1)k)] : p!$$

eingeführt worden⁴⁵⁾, deren Zähler als Fakultäten eingehend untersucht sind⁴⁶⁾. Die analytische Behandlung gehört nicht hierher.

Zwischen den Binomialkoeffizienten giebt es eine unübersehbare Zahl von Relationen, deren Klassifizierung von *J. G. Hagen* angebahnt ist⁴⁷⁾. Vgl. auch die „figurierten Zahlen“ der Alten.

14. Anwendungen. Wie schon in Nr. 1 erwähnt wurde, bieten die meisten Anwendungen analytischer Natur der Kombinatorik nur noch historisches Interesse dar. Wir beschränken uns darauf, die wichtigsten Zweige anzugeben, welche die Kombinatorik zu stützen unternommen hatte. An erster Stelle gehört hierher die Wahrscheinlichkeitsrechnung, in deren elementaren Teilen ja ununterbrochen kombinatorische Fragen auftreten, und von der aus umgekehrt die Kombinatorik manche Anregung erhalten hat. Sie knüpft ferner an

42) *Traité du triangle arithmétique*. Paris (1665) posth.; u. schon früher bei *M. Stifel*, *Arithm. integra*. Norimb. (1544), p. 44.

43) *Pascal* „productum continuorum“.

44) *N. H. Abel*, *J. f. M.* 1 (1826), p. 159 giebt einen Spezialfall; allgemein *A. v. Burg*, *J. f. M.* 1 (1826), p. 367. — *Cwley*, *Phil. Mag.* 6 (1853), p. 185 = Werke II, 102.

45) *Bl. Pascal*, siehe oben.

46) *L. Euler*, *Calc. diff. II. c.* 16 u. 17. Berl. (1755). *Öttinger*, *J. f. M.* 33 (1846), p. 1, 117, 226, 329; ferner 35 (1847), p. 13 u. 38 (1849), p. 162, 216; endlich 44 (1852), p. 26 u. 147, wo auch Historisches aufgeführt ist.

47) *Synopsis*. Berlin (1891), p. 64ff. Vgl. auch *G. Eisenstein*, Brief an *M. A. Stern*, *Z. f. Math.* 40 (1895), p. 193 der hist. Abtl.

die Theorie der Reihen an, bestimmt formal die Produkte, Potenzen, Quotienten von Reihen; das Resultat der Substitution einer Reihe für die Variable z in eine Reihe, die nach Potenzen von z fortschreitet; die formale Umkehrung von Reihen; die Rationalisierung solcher in welche Irrationalitäten eingehen; die allgemeinen Glieder wiederkehrender Reihen; die Logarithmen von Reihen und Reihen von Logarithmen u. s. w. Ebenso giebt sie die Form für die höheren Differentiale von komplizierteren Funktionen u. s. w. Für ihre Zwecke hatte sie ein vollständiges Bezeichnungssystem ersonnen, welches jetzt freilich durchaus veraltet ist⁴⁸⁾.

Die gesamte Theorie der endlichen discreten Gruppen (I A 2) kann unmittelbar an die Kombinatorik angeschlossen werden.

Noch eine zweite Anwendung, die auf die Lösung linearer Gleichungen gerichtete, hat sich in überraschender Weise entwickelt. Sie ist zur *Lehre von den Determinanten* geworden.

15. Determinanten. Erklärung des Begriffs. Es seien n^2 Grössen a_{ik} ($i, k = 1, 2, \dots, n$) gegeben; man bilde alle $n!$ Produkte $a_{i_1 i_2} \dots a_{i_n i_n}$ in denen i_1, i_2, \dots, i_n eine P. von $1, 2, \dots, n$ bedeutet und gebe jedem das Zeichen $+$ oder $-$, je nachdem diese P. zur ersten oder zweiten Klasse gehört. Die Summe dieser $n!$ Summanden ist die *Determinante* n^{ten} Grades⁴⁹⁾. *A. L. Cauchy*⁵⁰⁾ definiert sie auch so, dass er das alternierende Produkt $\prod (a_i - a_k)$, ($i = 1, 2, \dots, n; k = i + 1, \dots, n$) entwickelt und die Exponenten als zweite untere Indices schreibt. *E. Schering*⁵¹⁾ giebt eine geometrische und eine analytische Erklärung. *Kronecker* legte in seinen Vorlesungen eine funktionentheoretische Grundlage.

An Bezeichnungen sind die üblichsten⁵²⁾

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix} = \sum \pm a_{11} a_{22} \dots a_{nn} = | a_{h1} \ a_{h2} \ \dots \ a_{hn} | \quad | a_{1k} \ a_{2k} \ \dots \ a_{nk} |$$

($h, k = 1, 2, \dots, n$).

48) Vgl. *Hindenburg*, Nov. Syst. etc. Leipz. (1781).

49) *Jacobi*, J. f. M. 22 (1841), p. 285 = Werke III, p. 355.

50) *Analyse algébrique*. Paris (1821).

51) *Gött. Abh.* 22 (1879), p. 102.

52) Die dritte Bezeichnung ist von *L. Kronecker* vielfach verwendet; die letztere zuerst von *St. Smith*, Brit. Ass. Rep. (1862) p. 504. Als neu eingeführt hat sie dann *L. Kronecker*, J. f. M. 68 (1868), p. 273. Über weitere Bezeichnungen vgl. *Cayley*, Phil. Mag. 21 (1861), p. 180. *Newton*, Lond. phil. Mag. 5. 44 (1897) p. 396. *W. Schrader*, Determinanten. Halle 1887.

Historisch zu bemerken ist, dass die Determinanten von *Leibnitz*⁵³⁾ und später unabhängig von *Cramer*⁵⁴⁾ erfunden und zunächst zur Auflösung eines Systems linearer Gleichungen benutzt worden sind. Die ersten ausführlichen theoretischen Darlegungen stammen von *J. Binet* und *Cauchy*; allgemein eingeführt wurde die Lehre über die D. durch *Jacobi*⁵⁵⁾. Ausführliche Litteraturangaben findet man bei *Muir*⁵⁶⁾ von Beginn der Theorie bis zum Jahre 1885 fortgesetzt; Historisches auch bei *S. Günther*, Determinantentheorie, Erlangen (1875), bei *Baltzer*, Determinanten, Leipzig (1881) und bei *G. Salmon*, Modern higher algebra, Note I im Anschluss an *Baltzer*.

16. Definitionen. Die Grössen a_{ik} heissen die *Elemente* (El.) der D.; der erste (zweite) Index giebt die Ordnungszahl der Zeile (Spalte). Die Grössen a_{ii} bilden die *Hauptdiagonale*; die $a_{i,n+1-i}$ bilden die *Nebendiagonale*. Das Glied $a_{11}a_{22} \dots a_{nn}$ der D. heisst ihr *Hauptglied*. Wählt man m Werte des ersten und m des zweiten Index aus $1, 2, \dots n$ aus, so bilden die zugehörigen El. eine *Subdeterminante* (Subd.) m^{ten} Grades⁵⁷⁾. Sind die El. ihrer Hauptdiagonale zugleich El. derjenigen der D., dann heisst die Subd. eine *Hauptsubdeterminante*. Ist das Produkt der Hauptglieder zweier Subd. ein Glied der D., so heissen die Subd. *adjungiert*, oder auch *komplementäre* Subd.

Ist $a_{ik} = a_{ki}$, so heisst die D. eine *symmetrische* D.

Ist $a_{ik} = a_{i+k-2}$, so heisst die D. eine *rekurrierende* (einseitige, *orthosymmetrische*). Sie ist symmetrisch⁵⁸⁾.

Ist $a_{ik} = a_{i+1,k+1}$, wobei die Indices mod. n reducirt werden, so heisst die D. eine *Cirkulante*⁵⁹⁾, (auch *negativ-orthosymmetrische* D.).

Ist $a_{ik} + a_{ki} = 0$, $a_{ii} = 0$, so heisst die D. eine *halbsymmetrische*. Ist $a_{ik} + a_{ki} = 0$ für $i \neq k$, dann heisst die D. eine *schiefe*⁶⁰⁾.

53) Lettres à l'Hospital (1693). — Acta Erudit. Leipz. (1700), p. 206.

54) Intro. de l'anal. des courbes algèbr. (1750). Genève. Appendice p. 656.

55) J. de l'Éc. Polytechn. Cah. 16 (1812), p. 280 u. Cah. 17 (1812), p. 29. — *Jacobi*, J. f. M. 22 (1841), p. 285 = Werke III, p. 355.

56) Quart. J. 18 (1882), p. 110; ibid. 21 (1886), p. 299. — Edinb. Proc. 13 (1886), p. 547. — Im Phil. Mag. (5), 18 (1884), p. 416 macht *Muir* auf *Ferd. Schweins* als einen vergessenen Entdecker aufmerksam, „Theorie der Differenzen u. Differentiale“ (1825). Heidelberg. Cap. IV, p. 317.

57) Auch Unterdeterminante, Partialdeterminante, Minor.

58) *H. Hankel*, Dissert. Leipz. (1861) Göttingen. — „Recurrierend“ nach *G. Frobenius*; Berl. Ber. (1894), p. 253.

59) *Th. Muir*, Quart. J. (1882), p. 166. *Hankel* l. c.

60) *Jacobi*, J. f. M. 2 (1857), 354; ibid. 29 (1845), p. 236. *Cayley*, J. f. M. 38 (1849), p. 93; ibid. 32 (1846), p. 119; ibid. 50 (1855), p. 299. *Cayley* bezeichnet die halbsymmetrischen D. als „schiefsymmetrische“.

Ist $a_{ik} = a_{n+1-i, n+1-k}$, so heisst die D. eine *centrosymmetrische*.

17. Anzahl-Probleme hinsichtlich der Glieder. Die Anzahl der Glieder einer D. n^{ten} Grades ist $n!$. Es knüpfen sich hieran weitere Fragen: wie viele der Glieder enthalten eine vorgeschriebene Anzahl von El. der Hauptdiagonale⁶¹⁾? Wie viele Glieder hat eine D., deren Hauptdiagonale k El. 0 enthält⁶²⁾? Wie viele verschiedene Glieder giebt es in symmetrischen, wie viele in halbsymmetrischen D.⁶³⁾?

18. Elementare Eigenschaften. Die folgenden Eigenschaften elementarer Natur zeigen sich sofort: man kann, ohne den Wert der D. zu ändern, jede a^{te} Z. zur a^{ten} Sp. machen⁶⁴⁾. Bei Transposition zweier Parallelreihen ändert sich das Vorzeichen der D.; folglich ist eine D. mit zwei identischen Parallelreihen gleich Null⁶⁵⁾. Die D. kann als lineare, homogene Funktion der El. jeder Reihe dargestellt werden⁶⁶⁾. Daraus folgt, dass man einen gemeinsamen Faktor aller El. einer Reihe vor die D. ziehen kann. Der Grad einer D. lässt sich durch passende *Ränderung*, d. h. Anfügung neuer Z. und Sp. vermehren. Stimmen zwei D. in $(n-1)$ Reihen überein, so können sie zu einer D. mit denselben $(n-1)$ Reihen summiert werden. Ist $a_{ik} = b_{ik} + c_{ik}$ ($k=1, \dots, n$), so zerfällt umgekehrt die D. in einzelne Summanden. Die lineare, homogene Darstellung liefert die partielle Ableitung der D. nach a_{ik} . Bezeichnen wir sie mit a'_{ik} , so folgt $\sum_{\lambda} a_{i\lambda} a'_{\lambda k} = \varepsilon_{ik} D$, (d. h. $= D$, wenn $i = k$, sonst $= 0$)⁶⁷⁾. Wie die a' , so können auch die höheren Subd. als partielle Ableitungen höherer Ordnung dargestellt werden⁶⁸⁾.

Die D. ändert ihren Wert nicht, wenn zu einer Reihe eine Parallelreihe addiert oder von ihr subtrahiert wird⁶⁹⁾.

61) Baltzer, Determin. 4. Aufl. Leipz. 1875, p. 39. Leipz. Ber. (1873), p. 534. C. J. Monro, Messeng. (2), 2 (1872), p. 38.

62) N. v. Szütz, Math. Ann. 33 (1889), p. 477.

63) J. J. Weyrauch, J. f. M. 74 (1872), p. 273. Cayley, Monthly Not. of Astron. Soc. 34 (1873—74), p. 303 u. p. 335. G. Salmon, Modern Algebra Dublin (1885), p. 45.

64) J. C. Becker, Z. f. M. 16 (1871), p. 326. Gordan, Vorles. üb. Invar.-Th. (1885), p. 21. — Die D. wird „gestürzt“.

65) Ch. A. Vandermonde, Par. Acad. (1772), 2^e part., p. 518, 522.

66) Cramer, l. c. J. L. Lagrange, Berl. Mem. (1773), p. 149, 153.

67) ε_{ik} von Kronecker eingeführt, J. f. Math. 68 (1868), p. 273. Setzt man $a'_{ik} D = \alpha_{ik}$, so nennt Kronecker die Systeme a_{ik} , α_{ik} reciproke Systeme.

68) Jacobi, J. f. Math. 22 (1841), p. 285, § 10. — Werke III, p. 365.

69) Jacobi, J. f. Math. 22 (1841), p. 371 = Werke III, p. 452.

Mit Hülfe der angegebenen Sätze kann die Berechnung von D . mit Zahlen-El. häufig abgekürzt werden, ebenso wie die von D ., deren El. analytischen Gesetzen folgen. Es besteht eine fast unübersichtbare Zahl von Einzelresultaten; die Heraushebung auch nur der wichtigsten würde den Rahmen dieser Darstellung sprengen⁷⁰⁾.

19. Laplace'sche und andere Zerlegungssätze. Von *P. S. Laplace*⁷¹⁾ rührt ein wichtiger Satz her über die Entwicklung von D . nach Produkten adjungierter Subd. Aus den m ersten Z . (Sp.) werden alle möglichen Subd. m^{ten} Grades, aus den folgenden Z . (Sp.) alle adjungierten $(n - m)^{\text{ten}}$ Grades gebildet. Dem Produkte zweier adjungierten wird ein solches Vorzeichen gegeben, dass das Produkt ihrer Hauptglieder ein Glied der D . ist. Die Summe dieser Produkte ist gleich der D . Nimmt man beliebige m und $(n - m)$ Z . (Sp.), so ist die Summe $= 0$, wenn auch nur eine gemeinsame Reihe vorkommt⁷²⁾. *Jacobi* zieht hieraus eine Reihe von Schlüssen über D . mit Null-Elementen⁷³⁾.

Sehr naheliegend ist die Erweiterung des Satzes nach der Richtung, dass die Produkte aus mehr als zwei Faktoren bestehen⁷⁴⁾.

Eine andere Erweiterung benutzt die Ränderung der D . und giebt an, wie aus jedem durch die *Laplace'sche* Formel gelieferten Resultate ein neues über geränderte D . sich ableiten lässt⁷⁵⁾. Dieser Erweiterung stellt sich eine andere die adj. Subd. betreffend zur Seite⁷⁶⁾.

20. Entwicklungen. Von weitem Entwicklungen wäre noch zu erwähnen die einer D ., bei welcher die Diagonalglieder $a_{ii} = b_{ii} + z$ heissen; die Entwicklung geschieht nach Potenzen von z .⁷⁷⁾ Ferner ist die Entwicklung einer einreihig geränderten D . $(n + 1)^{\text{ten}}$ Grades nach den El. des Randes von Wichtigkeit⁷⁸⁾. Von *O. Hesse* stammt

70) Vgl. die Beispiele in *Baltzer, S. Günther, R. F. Scott, Salmon* u. s. w.

71) *Recherches sur le calcul intégral et sur le système du monde*. Paris Ac. d. Sc. (1772) 2^e part., p. 267. — *Cauchy*, l. c. p. 100. — *Jacobi*, l. c. Nr. 5.

72) *Cauchy*, l. c.

73) *Jacobi*, l. c. Nr. 5.

74) *Vandermonde*, l. c. p. 524. — *Laplace*, l. c. p. 294. — *Jacobi*, l. c. Nr. 8.

75) *Netto*, J. f. Math. 114 (1895), p. 345.

76) *E. Pascal*, Rend. Acc. d. Linc. (5) 5, (1896), p. 188. Das dort aufgestellte Theorem folgt übrigens aus dem vorigen vermittle eines allgemeinen Satzes von *Th. Muir*, Edinb. Transact. 30 (1882), p. 1, durch den man von einer Formel über Subd. zu einer andern über adjungierte Subd. übergehen kann.

77) *Laplace*, Mécan. céleste, 1, liv. 2, Nr. 56. Paris (1799). — *Jacobi*, J. f. Math. 12 (1834), p. 15 = Werke III, p. 208.

78) *Cauchy*, l. c. p. 69.

ein Satz über Zerfällung der geränderten D., falls die ungeränderte verschwindet⁷⁹⁾.

21. Komposition und Produkt. Das Produkt einer D. m^{ten} in eine D. n^{ten} Grades lässt sich durch Aneinanderschreiben in Diagonalrichtung (*Laplace'scher Satz*) leicht als D. $(m+n)^{\text{ten}}$ Grades darstellen. *J. Ph. M. Binet* und *A. L. Cauchy* haben das Produkt zweier D. n^{ten} Grades wieder als D. n^{ten} Grades dargestellt⁸⁰⁾. Gleichzeitig haben sie folgende Erweiterung gegeben: Aus zwei Systemen a_{ik} , b_{ik} wird ein drittes c_{ik} gebildet, komponiert,

$$a_{ik} \quad (i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, n); \quad b_{ik} \quad (i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m)$$

$$c_{ik} = \sum a_{i\lambda} b_{\lambda k} \quad (i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, m; \lambda = 1, \dots, n);$$

dann ist $|c_{ik}| = 0$ für $m > n$; ferner $|c_{ik}| = |a_{ik}| |b_{ik}|$ für $m = n$; und endlich $|c_{ik}| = \sum_i |a_{it}| |b_{it}|$ für $m < n$, wobei t alle möglichen Kombinationen m^{ter} Klasse aus $1, 2, \dots, n$ durchläuft. Der mittlere Fall giebt die Multiplikationsregel⁸¹⁾; die verschiedene Anordnung der El. in Z. und Sp. liefert vier verschiedene Formen für das Produkt⁸²⁾. An diese Darstellung knüpfen sich analytisch und zahlentheoretisch wichtige Formeln⁸³⁾.

22. Andere Art von Komposition. Auf eine andere Art von Komposition hat *Kronecker*⁸⁴⁾ aufmerksam gemacht: a_{ik} ($i, k = 1, \dots, m$) und b_{gh} ($g, h = 1, \dots, n$) werden zu $c_{pq} = a_{ik} b_{gh}$ ($p = i + 1 \dots n + g$; $q = (k-1)n + h$; $i, k = 1, \dots, m$; $g, h = 1, \dots, n$) komponiert. Dann ist

$$|c_{pq}| = |a_{ik}|^n \cdot |b_{gh}|^m.$$

23. Zusammengesetzte Determinanten. Eingehendes Interesse hat sich der Frage nach den *zusammengesetzten* D. (compound det.) zugewendet, d. h. nach solchen, deren Elemente selbst wieder nach gewissen Gesetzen gebildete D. sind. Am nächstliegenden ist die Untersuchung der aus den El. a'_{ik} , d. h. den Adjunkten der a_{ik} gebildeten D. *Cauchy*⁸⁵⁾ hat für $|a'_{ik}|$ ($i, k = 1, \dots, n$) den Wert ange-

79) J. f. Math. 69 (1868), p. 319.

80) J. de l'Éc. polyt. Cah. 16 (1812), p. 280; Cah. 17 (1812), p. 29.

81) Weitere Beweise u. a.: J. König, Math. Ann. 14 (1879), p. 507. M. Fulk, Brit. Ass. Rep. (1878), p. 473. A. V. Janet, Nouv. Corresp. M. 3 (1877), p. 247.

82) *Cauchy*, l. c. p. 83.

83) Ch. Hermite, J. f. Math. 40 (1850), p. 297. K. F. Gauss Werke 3, p. 384. Baltzer, Leipz. Ber. (1873), p. 352. S. Gundelfinger, Z. f. Math. 18 (1873), p. 312.

84) Vorlesungen. K. Hensel, Acta mat. 14 (1890-91), p. 317. Netto, Acta mat. 17 (1894), p. 200. B. Igel, Monatsh. f. Math. 3 (1892), p. 55. G. v. Escherich, ib. 3 (1892), p. 68.

85) l. c. p. 82.

geben; *Jacobi*⁸⁶⁾ allgemeiner für $|a'_{ik}|$ ($i, k = 1, 2, \dots m; m < n$). Im ersten Falle tritt eine Potenz von D . auf, im zweiten eine solche, multipliziert mit einer Subd. $|a_{ik}|$.

Diese Sätze sind von *Franke*⁸⁷⁾ erweitert worden; statt der a'_{ik} werden die Subd. m^{ten} Grades p_{ik} ($i, k = 1, 2, \dots \mu$) betrachtet, wo $\mu = \binom{n}{m}$ ist, und die Numerierung auf alle μ Subd. m^{ten} Grades von D . sich erstreckt. Ferner soll p'_{ik} zu p_{ik} adjungiert sein, d. h. p'_{ik} ist eine Subd. $(n-m)^{\text{ten}}$ Grades von $|a_{ik}|$, und das Produkt der Hauptglieder von p_{ik} und p'_{ik} ist ein Glied von $|a_{ik}|$. Es ergibt sich dann

$$|p_{ik}| = D^{\binom{n-1}{m-1}}, \quad |p'_{ik}| = D^{\binom{n-1}{m-1}},$$

und auch hier kann man die Subd. von $|p'_{ik}|$ in ähnlicher Weise darstellen, wie bei *Jacobi* die Subd. von $|a'_{ik}|$.⁸⁸⁾

Allgemeiner noch ist der *Sylvester'sche* Satz⁸⁹⁾, den wir kurz dahin charakterisieren können, dass er sich auf Ränderung der D . $|p_{ik}|$ bezieht.

Andere Arbeiten beschäftigen sich damit, D . aus Reihen zweier gegebenen D . zusammenzusetzen, und diese neuen D . als Elemente einer D . aufzufassen⁹⁰⁾.

24. Rang der Determinante. Nach *Kronecker* bezeichnet man als *Rang* r einer D . die grösste Zahl von der Beschaffenheit, dass nicht alle Subd. r^{ten} Grades verschwinden⁹¹⁾. Durch Vertauschung und durch lineare Kombinationen der Reihen wird r nicht geändert. Ist D vom Range r , so können seine El. aus zwei Systemen a_{ik} ($i = 1, \dots n; k = 1, \dots r$) und b_{ik} ($i = 1, \dots r; k = 1, \dots n$) komponiert werden⁹²⁾. Von Wichtigkeit ist dieser Begriff für viele Fragen der Algebra, besonders Auflösung linearer Gleichungen (IB1b).

86) l. c. § 11. — *C. W. Borchardt*, Brief an *Baltzer* (1853).

87) *J. f. Math.* 61 (1863), p. 350.

88) *C. W. Borchardt*, *J. f. Math.* 61 (1863), p. 353, 355, macht darauf aufmerksam, dass der Satz ein Spezialfall des früher von *Sylvester* gegebenen ist; *Kronecker*, *Berl. Ber.* (1882), p. 822 weist seine Identität mit dem obigen von *Jacobi* nach. — Vgl. *Picquet*, *C. R.* 86 (1878), p. 310; *J. de l'Éc. Pol. cah.* 45 (1878), p. 201.

89) *Phil. Mag.* (4), 1 (1851), p. 415. Vgl. *Frobenius*, *J. f. Math.* 86 (1879), p. 54; *Berl. Ber.* (1894), p. 242. — *Netto*, *Acta mat.* 17 (1894), p. 201; *J. f. Math.* 114 (1895), p. 345. *R. F. Scott*, *Lond. Proceed.* 14 (1883), p. 91. *C. A. v. Velzer*, *Amer. J.* 6 (1883), p. 164. *Ém. Barbier*, *C. R.* 96 (1883), p. 1845; *ib.* 97 (1883), p. 82. *E. J. Nanson*, *Lond. phil. Mag.* (5) 44 (1897), p. 396.

90) *Picquet*, l. c. *G. Zehfuss*, *Z. f. Math.* 7 (1862), p. 496.

91) *Berl. Ber.* (1884), p. 1071.

92) *Kronecker*, *J. f. Math.* 72 (1870), p. 152. *Baltzer*, *Determinanten*, 4. Aufl. *Leipz.* (1875), p. 53.

25. Hier mag noch ein auf allgemeine D. bezüglicher Satz von *Mac-Mahon* erwähnt werden (Phil. Trans. 185 (1894), p. 146). Zwischen einer D. und all den Subd., deren Hauptdiagonalen in die Hauptdiagonale der D. fallen, bestehen $2^n - n^2 + n - 2$ Relationen. Vgl. auch *Muir*, Phil. Mag. (1894), p. 537; Edinb. Proceed. 20 (1895), p. 300. *Cayley*, ibid. p. 306. *Nanson*, ibid. (1897), p. 362.

26. Symmetrische Determinanten. Bei *symmetrischen*, d. h. solchen D., deren El. in Beziehung auf die Hauptdiagonale symmetrisch sind, bilden auch die a_{ik} eine symmetrische D. — Jede Potenz einer symmetrischen D., und jede gerade Potenz einer beliebigen D. ist symmetrisch⁹³). Das Produkt aus einer symmetrischen D. in das Quadrat einer beliebigen D. ist als symmetrische D. darstellbar⁹⁴). Ist r der Rang einer symm. D., so hat sie eine nicht verschwindende Hauptsubd. vom Grade r .⁹⁵) *H. G. Grassmann* hatte zuerst angegeben⁹⁶), dass zwischen den Subd. symmetrischer D. lineare Relationen bestehen; denselben Satz hat später *Kronecker* wieder gefunden⁹⁷), und *C. Runge* hat gezeigt⁹⁸), dass die von ihm gegebenen Relationen die einzigen vorhandenen sind. Diese haben folgenden Charakter:

$$|a_{gh}| = \sum |a_{ik}| \quad (g = 1, \dots, m; h = m + 1, \dots, 2m; i = 1, \dots, m - 1, r; \\ k = m + 1, \dots, r - 1, m, r + 1, \dots, 2m).$$

Rändert man eine symmetrische, verschwindende D. in symmetrischer Weise, so ist die entstehende D. als Function der Ränderungs Elemente aufgefasst ein Quadrat⁹⁹), wie sich aus Nr. 19 leicht ergibt. Trägt man $a_{ii} + z$ statt der a_{ii} ein und setzt die entstehende symmetrische D. gleich Null, dann hat diese Gleichung in z nur reelle Wurzeln. Die entstehende Gleichung heisst die „Säculargleichung“¹⁰⁰). (Vgl. Nr. 31.)

93) *H. Seeliger*, Z. f. Math. 20 (1875), p. 468 bestimmt die El. einer beliebigen Potenz einer sym. D.

94) *O. Hesse*, J. f. Math. 49 (1853), p. 246. — Vgl. über eine Erweiterung *Muir*, Amer. J. 4 (1881), p. 351.

95) *S. Gundelfinger*, J. f. Math. 91 (1881), p. 235; vgl. *Hesse*, analyt. Geom. d. Raumes, 3. Aufl. Leipz. (1881), p. 460. *Frobenius*, Berl. Ber. (1894), p. 245.

96) Ausdehnungslehre, Berlin (1862), p. 131. Vgl. *Mehnkne*, Math. Ann. 26 (1885), p. 209. Die Art wie *Grassmann* statt der D. gewisse „kombinatorische Produktbildungen“ benutzt, erkennt man am einfachsten aus der „Übersicht“ (Arch. f. Math. 6 [1845], p. 337). Genaueres findet sich in der „Ausdehnungslehre“ § 37, § 51 ff., § 63 ff. Die D. tritt dabei als ein Produkt $H a_1 e_1 + a_2 e_2 + \dots$ „extensiver Größen“ auf, bei dem $e_x^2 = 0$, $e_x e_2 = - e_2 e_x$ ist.

97) Berl. Ber. (1882), p. 821. Vgl. *Darboux*, J. d. Mat. (2) 19 (1874), p. 347.

98) J. f. Math. 93 (1882), p. 319.

99) *Cauchy*, l. c., p. 69.

100) *J. L. Lagrange*, Mém. de Berlin (1773), p. 108 für $n = 3$; allgemein

27. Rekurrierende Determinanten. Cirkulanten. Die Symmetrie tritt bei *rekurrierenden* D. $a_{ik} = a_{i+k-2}$ in noch verstärktem Masse auf. *Hankel* (l. c.), der sie als orthosymmetrisch bezeichnet, stellt sie als $|\Delta_k|$ dar, wo die Δ_k die Anfangsglieder der Differenzenreihen der a_{i+k} sind. Diese D. treten vielfach in der Algebra auf¹⁰¹); ihr Rang wird dabei von Bedeutung.

Einen Specialfall hiervon bilden diejenigen rekurrierenden D. n^{ten} Grades, bei denen $a_{n+i} = a_i$ ist¹⁰²); und mit diesen hängen eng die *Cirkulanten* (vgl. Nr. 16) zusammen ($a_{i,k} = a_{i+1,k+1}$), die in Beziehung auf die Nebendiagonale symmetrisch sind, welche sich durch Vertauschung der Z. in jene umwandeln lassen. Eine Cirkulante ist in das Produkt aus den n Faktoren

$$a_1 + \omega^\alpha a_2 + \omega^{2\alpha} a_3 + \dots + \omega^{(n-1)\alpha} a_n, \quad (\alpha = 1, 2, \dots, n)$$

auflösbar, wobei ω eine primitive n^{te} Wurzel der Einheit bedeutet; daraus folgt sofort, dass eine Cirkulante $2n^{\text{ten}}$ Grades als solche n^{ten} Grades darstellbar ist¹⁰³). Eine Cirkulante $2n^{\text{ten}}$ Grades kann ferner als Produkt einer solchen n^{ten} Grades und einer ähnlich gebildeten ausgedrückt werden¹⁰⁴).

28. Halbsymmetrische Determinanten. Für *halbsymmetrische* D. ($a_{ik} = -a_{ki}$; $a_{ii} = 0$)¹⁰⁵) gelten die Sätze: $a'_{ik} = a'_{ki}$; $\frac{\partial D}{\partial a_{ik}} = 0$; $D = 0$ für ungerades n ; dagegen $a'_{ik} = -a'_{ki} = \frac{1}{2} \frac{\partial D}{\partial a_{ik}}$; $a'_{ii} = 0$; und D ist ein Quadrat für gerades n . Jedes Glied von \sqrt{D} ist ein Produkt von $\frac{1}{2}n$ El. a_{ik} , deren Indices alle unter einander verschieden sind, wie z. B. das in \sqrt{D} auftretende Glied $a_{12} a_{34} \dots a_{n-1,n}$ zeigt. \sqrt{D} wird von *Cayley* (l. c.) $= \pm (1, 2, \dots, n)$ gesetzt und als „*Pfaffian*“ bezeichnet.

Cauchy, Exerc. d. Math. 4 (1829), p. 140. Vgl. *E. Kummer*, J. f. Math. 26 (1843), p. 268. *G. Bauer*, J. f. Math. 71 (1870), p. 46. *Sylvester*, Phil. Mag. 2 (1852), p. 138. *Borchardt*, J. de Math. 12 (1847), p. 50; J. f. Math. 30 (1846), p. 38.

101) *Jacobi*, J. f. Math. 15 (1836), p. 101. *Kronecker*, Berl. Ber. (1881), Juni; J. f. Math. 99 (1886), p. 346. *Frobenius*, Berl. Ber. (1894), p. 241.

102) „persymmetrische D.“ nach *Muir*, Quart. J. 18 (1882), p. 264.

103) *J. W. L. Glaisher*, Quart. J. 15 (1878), p. 347; *ibid.* 16 (1878), p. 31. Vgl. auch I A 6, Nr. 23, 24.

104) *R. F. Scott*, Quart. J. 17 (1880), p. 129.

105) *Lagrange* u. *S. D. Poisson* sind wohl, *Jacobi* zufolge, zuerst auf solche D. gestossen. Vgl. *Jacobi*, J. f. Math. 2 (1827), p. 354. — *Cayley*, J. f. Math. 38 (1849), p. 93, nennt sie „schief-symmetrisch“. Er beweist zuerst, dass D ein Quadrat ist bei geradem n . J. f. Math. 32 (1846), p. 119; *ibid.* 50 (1855), p. 299.

106) *Brioschi*, J. f. Math. 52 (1856), p. 133. *Cayley*, l. c. Vgl. eine Erweiterung von *Muir*, Phil. Mag. (5) 12 (1881), p. 391.

Das Quadrat jeder D. geraden Grades kann in eine halbsymmetrische D. umgeformt werden¹⁰⁶⁾, so dass die D. selbst als Pfaffian auftritt. *Cayley* hat ferner gezeigt (l. c.), dass wenn man eine halbsymmetrische D. ungeraden Grades beliebig durch $a_{\alpha\beta}$ rändert, die entstehende D. in ein Produkt $\pm(\alpha, 2, \dots n) \cdot (\beta, 2, \dots n)$ zweier Pfaffians zerfällt. Für $\alpha = \beta = 1$ geht daraus der vorige Satz hervor.

29. Schiefe Determinanten. Lässt man die Bedingung $a_{ii} = 0$ fallen, so gelangt man zu den *schiefen* D., deren Behandlung gleichfalls auf *Cayley* zurückzuführen ist (l. c.). Die Entwicklung der schiefen D. nach den Gliedern der Hauptdiagonale (Nr. 20) liefert Aggregate von halbsymm. D. Ist also jedes $a_{ii} = z$, so treten bei der Entwicklung von D. nach Potenzen von z nur die Glieder mit den Exponenten $n, n-2, n-4, \dots$ auf.

30. Centrosymmetrische und andere Determinanten. Endlich seien noch die *centrosymmetrischen* D. ($a_{ik} = a_{n+1-i, n+1-k}$) kurz erwähnt. Jede derartige von geradem Grade $2m$ kann als Produkt zweier D. m^{ten} Grades dargestellt werden. Da nun Cirkulanten (Nr. 27) durch Umstellung der Zeilen zu centrosymmetrischen D. gemacht werden können, so folgt der (Nr. 27) erwähnte Satz leicht aus diesem.

31. Weitere Determinantenbildungen. Ausser den angeführten besonderen Bildungen sind noch viele andere untersucht worden; so knüpfen sich z. B. an die letztbesprochenen die *centroschiefen* D. an; ferner sind die *Vandermonde'schen* oder *Potenzdeterminanten* zu erwähnen, bei denen $a_{ik} = a_i^{v_k}$ ist, wobei die v_k beliebige Zahlen bedeuten. Die Kettenbruch-Determinanten¹⁰⁷⁾, die *Continuanten* (*Sylvester*), liefern die Darstellung der Zähler und Nenner der Näherungswerte eines Kettenbruches¹⁰⁸⁾. *Hermite* betrachtet Par. C. R. 41 (1855), p. 181, J. f. Math. 52 (1856), p. 40 Det., in denen a_{ik} und a_{ki} konjugiert complex sind. Erweiterung der Säkulargleichung.

An die Funktionentheorie knüpfen Bildungen an wie: 1) die *Wronski'sche* D.; 2) die *Jacobi'sche* (Funktional)-D.; 3) die *Hesse'sche* D.

Bei 1) sind die a_{1i} Funktionen von x ; die a_{2i} ihre $(x-1)^{\text{ten}}$ Ableitungen¹⁰⁹⁾.

107) *Painvin*, J. d. Math. (2) 3 (1858), p. 41. *J. Sylvester*, Am. J. 1 (1878), p. 344.

108) *Sylvester*, Phil. Mag. 5 (1859), p. 458; 6 (1853), p. 297. *W. Spottiswoode*, J. f. Math. 51 (1856), p. 209. *E. Heine*, ibid. 57 (1860), p. 231. *S. Günther*, Erlangen (1873) u. Math. Ann. 7 (1874), p. 267. -- Vgl. I A 3.

109) *C. J. Malmsten*, J. f. Math. 39 (1850), p. 91. *Hesse*, ibid. 54 (1857), p. 249. *E. B. Christoffel*, ibid. 55 (1858), p. 281. *Frobenius*, ibid. 76 (1873), p. 236. *M. Pasch*, ibid. 80 (1875), p. 177.

Bei 2) sind a_i Funktionen von n Variablen x_1, \dots, x_n , und a_{xi} ist $= \frac{\partial a_i}{\partial x_x}{}^{110}$.

Bei 3) ist a eine Funktion von x_1, \dots, x_n , und a_{xi} ist $= \frac{\partial^2 a}{\partial x_x \partial x_i}{}^{111}$.

An die Algebra knüpfen Bildungen an wie *Resultanten* und *Discriminanten*. Wir verweisen hierüber auf I B 1 a und b.

32. Determinanten höheren Ranges. Determinanten höheren (n^{ten}) Ranges werden aus n^v Grössen a_{h_1, \dots, h_v} , derart gebildet, dass man die Indices gleicher Stelle unter sich vertauscht; dann werden Produkte von je n dieser Grössen gebildet, bei denen nie zwei Faktoren an gleicher Stelle gleichen Index haben, und endlich der frühern Zeichenregel entsprechend das \pm Zeichen vorgesetzt. Alle diese Aggregate bilden die D. Von ihnen gelten eine Reihe von Eigenschaften der gewöhnlichen Det.; andere sind zu modifizieren; Det. *geraden* und solche *ungeraden* Ranges verhalten sich in manchen Hinsichten verschieden¹¹²). Auch hier ist eine Behandlung im Sinne *Grassmann's* möglich (*G. v. Escherich* l. c.), vgl. Anm. 96.

33. Unendliche Determinanten. Betrachtet man a_{ik} ($i, k=1, 2, \dots, \infty$), so kann man $D_n = |a_{ik}|$ ($i, k=1, 2, \dots, n$) als Funktion von n auffassen. Wächst n , so gelangt man zum Begriffe *unendlicher Det.* Vor allem ist hier die Existenzfrage aufzuwerfen¹¹³). Diese Bildungen sind für Differenzialgleichungen von Wichtigkeit. Vgl. I A 3 Nr. 58, 59.

34. Matrizen. Ein System von $m \cdot n$ Grössen a_{ik} ($i=1, 2, \dots, m$; $k=1, 2, \dots, n$) heisst eine *Matrix*. An diese Gebilde schliesst sich eine Reihe fundamentaler Fragen, deren Behandlung in I A 4 (bilineare

110) *Jacobi*, J. f. Math. 12 (1834), p. 38 = Werke III, p. 233; J. f. Math. 22 (1841), p. 319 = Werke III, p. 393. *Sylvester*, Phil. Trans. (1854), p. 72. *Cayley*, J. f. Math. 52 (1856), p. 276. *Clebsch*, *ibid.* 69 (1868), p. 355. *Kronecker*, *ibid.* 72 (1870), p. 155 u. s. w.

111) *Hesse*, J. f. Math. 28 (1844), p. 83; *ibid.* 42 (1851), p. 117; *ibid.* 56 (1859), p. 263. *Sylvester*, *Cambr. a. Dubl. M. J.* 6 (1851), p. 186.

112) Zuerst behandelt wurden kubische D. von *A. de Gasparis* (1861). Es folgten: *Dahlander*, *Oefvers. of K. Akad. Stockh.* (1863). *G. Armenante*, *Giorn. di Battagl.* 6 (1868), p. 175. *E. Padova*, *ibid.* p. 182. *G. Zehfuss*, *Frankf.* (1868). *G. Garbieri*, *Giorn. d. Batt.* 15 (1877), p. 89. *H. W. L. Tanner*, *Proceed. Lond. M. S.* 10 (1879), p. 167. *R. F. Scott*, *ib.* 11 (1880), p. 17. *G. v. Escherich*, *Wien. Denkschr.* 43 (1882), p. 1. *L. Gegenbauer*, *ib.* 43 (1882), p. 17; 46 (1883), p. 291; 50 (1885), p. 145; 55 (1889), p. 39. *Wien. Ber.* 101 (1892), p. 425.

113) *G. W. Hill*, *Acta Math.* 8 (1886), p. 1, im Wes. Abdruck einer Monogr. *Cambridge U. S. A.* (1877). *H. Poincaré*, *Bull. Soc. d. Fr.* 13 (1884—85), p. 19; 15 (1885—86), p. 77. *Helge von Koch*, *Acta math.* 15 (1891), p. 53; *ibid.* 16 (1892 bis 1893), p. 217.

Formen) gegeben wird. Der Begriff des Ranges sowie der Komposition von Matrizen ist festzustellen. Aus einer Matrix können auf verschiedene Weise Det. gebildet werden. Ihr Zusammenhang, sowie ihre invarianten Eigenschaften sind zu untersuchen. Hierher gehört der Fall der *korrespondierenden Matrizen*: a_{ik} ($i=1, \dots, m$; $k=1, \dots, \alpha$) und b_{jl} ($j=1 \dots \beta$; $l=1, 2, \dots, m$), wobei $\alpha + \beta = m$ ist, und die $\alpha \cdot \beta$ Relationen bestehen $\sum_{(q)} a_{iq} b_{jq} = c_{kj} = 0$, bei denen Proportionalität korrespondierender Determinanten eintritt¹¹⁴).

35. Monographien. An Lehrbüchern über Determinanten führen wir, unter Übergang von nur für den Schulgebrauch bestimmten, als hauptsächlichste an:

Brioschi, La teoria dei determinanti. Pavia (1854). Deutsch, Berlin (1856).

Spottiswoode, Elementary Theorems relating to Determinants, J. f. Math. 51 (1856), p. 209—271 u. 328—381.

Baltzer, Theorie u. Anwendung der Determinanten. Leipzig (1857). Fünfte Aufl. (1881).

Salmon, Lessons introductory to the modern higher algebra. Dublin (1859). Deutsch Leipz. (1877) v. *Fiedler*.

Hesse, Die Determinanten, elementar behandelt. Leipz. (1872).

Günther, Lehrbuch der Determinantentheorie. Erlangen (1875). Zweite Aufl. (1877).

Scott, A treatise on the theory of determinants. Cambridge (1880).

P. Mansion, Éléments de la théorie des déterminants. Paris 4^e éd. (1883).

L. Leboulloux, Traité élémentaire des déterminants. Genève (1884).

A. Sickenberger, Die Determinanten in genetischer Behandlung. München (1885).

Gordan, Vorlesungen über Invariantentheorie. I. Determinanten. Leipz. (1885).

Pascal, I determinanti. Milano (1897).

¹¹⁴) Der Begriff der Matrix ist von *A. Cayley* eingeführt, J. f. Math. 50 (1855), p. 282. *Cayley* will die Theorie der Matrizen von derjenigen der Determinanten getrennt halten.

IA 3. IRRATIONALZAHLEN UND KONVERGENZ UNENDLICHER PROZESSE

VON

ALFRED PRINGSHEIM

IN MÜNCHEN.

Inhaltsübersicht.

Erster Teil. Irrationalzahlen und Grenzbegriff.

I. Irrationalzahlen.

1. *Euclid's* Verhältnisse und inkommensurable Grössen.
2. *Michael Stifel's* *Arithmetica integra*.
3. Der Irrationalzahlbegriff der analytischen Geometrie.
4. Das *Cantor-Dedekind'sche* Axiom und die arithmetischen Theorien der Irrationalzahlen.
5. Die Theorien von *Weierstrass* und *Cantor*.
6. Die Theorie von *Dedekind*.
7. *Du Bois-Reymond's* Kampf gegen die arithmetischen Theorien.
8. Die vollkommene Arithmetisierung im Sinne *Kronecker's*.
9. 10. Verschiedene Darstellungsformen der Irrationalzahlen und Irrationalität gewisser Darstellungsformen.

II. Grenzbegriff.

11. Der geometrische Ursprung des Grenzbegriffs.
12. Die Arithmetisierung des Grenzbegriffs.
13. Das Kriterium für die Grenzwert-Existenz.
14. Das Unendlichgrosse und Unendlichkleine.
15. Oberer und unterer Limes.
16. Obere und untere Grenze.
17. Das Rechnen mit Grenzwerten. Die Zahl $e = \lim \left(1 + \frac{1}{v}\right)^v$.
18. Sogenannte unbestimmte Ausdrücke.
19. Graduierung des Unendlich- und Nullwerdens.
20. Grenzwerte zweifach-unendlicher Zahlenfolgen.

Zweiter Teil. Unendliche Reihen, Produkte, Kettenbrüche und Determinanten.

III. Unendliche Reihen.

21. Konvergenz und Divergenz.
22. 23. Die Konvergenzkriterien von *Gauss* und *Cauchy*.
24. *Kummer's* allgemeine Kriterien.
25. Die Theorien von *Dini*, *Du Bois-Reymond* und *Pringsheim*.
26. 27. Die Kriterien erster und zweiter Art.
28. Andere Kriterienformen

29. Tragweite der Kriterien erster und zweiter Art.
30. Die Grenzgebiete der Divergenz und Konvergenz.
31. Bedingte und unbedingte Konvergenz.
32. Wertveränderungen bedingt konvergenter Reihen.
33. Kriterien für eventuell nur bedingte Konvergenz.
34. Addition und Multiplikation unendlicher Reihen.
35. Doppelreihen.
36. Vielfache Reihen.
37. Transformation von Reihen.
38. *Euler-Mac Laurin'sche* Summenformel. Halbkongvergente Reihen.
39. Divergente Reihen.
40. Divergente Potenzreihen.

IV. Unendliche Produkte, Kettenbrüche und Determinanten.

41. Unendliche Produkte: Historisches.
42. Konvergenz und Divergenz.
43. Umformung von unendlichen Produkten in Reihen.
44. Faktoriellen und Fakultäten.
45. } Allgemeine formale Eigenschaften der Kettenbrüche.
46. } Rekursorische und independente Berechnung der Näherungsbrüche.
47. Näherungsbrücheigenschaften besonderer Kettenbrüche.
48. Konvergenz und Divergenz unendlicher Kettenbrüche. Allgemeines Divergenzkriterium.
49. Kettenbrüche mit positiven Gliedern.
50. Konvergente Kettenbrüche mit Gliedern beliebigen Vorzeichens.
51. Periodische Kettenbrüche.
52. Transformation unendlicher Kettenbrüche.
53. Umformung einer unendlichen Reihe in einen äquivalenten Kettenbruch.
54. Anderweitige Kettenbruchentwicklungen unendlicher Reihen.
55. Kettenbrüche für Potenzreihen und Potenzreihenquotienten.
56. Beziehungen zwischen unendlichen Kettenbrüchen und Produkten.
57. Aufsteigende Kettenbrüche.
58. Unendliche Determinanten: Historisches.
59. Haupteigenschaften unendlicher Determinanten.

Litteratur.

Lehrbücher.

- Leonhard Euler*, Introductio in analysin infinitorum. I. Lausannae 1748. Deutsch von *Michelsen* (Berlin 1788) und von *H. Maser* (Berlin 1885).
- Augustin Cauchy*, Cours d'analyse de l'école polytechnique. I. Analyse algébrique. Paris 1821. Deutsch von *C. Itzigsola*, Berlin 1885.
- M. A. Stern*, Lehrbuch der algebraischen Analysis. Leipzig 1860.
- Eugène Catalan*, Traité élémentaire des séries. Paris 1860.
- Oskar Schlömilch*, Handbuch der algebraischen Analysis. Jena 1868. 4. Aufl.
- Charles Méray*, Nouveau Précis d'analyse infinitésimale. Paris 1872. Leçons nouvelles sur l'analyse infinitésimale. I. Paris 1894.
- Karl Hattendorff*, Algebraische Analysis. Hannover 1877.

Rudolf Lipschitz, Lehrbuch der Analysis. I: Grundlagen der Analysis. Bonn 1877.
Moritz Pasch, Einleitung in die Differential- und Integral-Rechnung. Leipzig 1882.
Max Simon, Elemente der Arithmetik als Vorbereitung auf die Functionentheorie. Strassburg 1884.

Otto Stolz, Vorlesungen über allgemeine Arithmetik. 2 Bde. Leipzig 1885. 86.
Jules Tannery, Introduction à la théorie des fonctions d'une variable. Paris 1886.
Camille Jordan, Cours d'analyse de l'école polytechnique. 2^{de} éd. I. Paris 1893.
Ernesto Cesaro, Corso di analisi algebrica. Torino 1894.
Otto Biermann, Elemente der höheren Mathematik. Leipzig 1895.
Alfred Pringsheim, Vorlesungen über die element. Theorie der unendl. Reihen und der analyt. Functionen. I. Zahlenlehre. (Demnächst bei B. G. Teubner, Leipzig, erscheinend.)

Bezüglich der Irrationalzahlen vergleiche man noch: *P. Bachmann*, Vorl. über die Natur der Irrationalzahlen, Leipzig 1892; bez. der unendlichen Reihen: *J. Bertrand*, Traité de calc. différentiel, Paris 1864¹⁾.

Monographien.

Siegm. Günther, Beiträge zur Erfindungsgeschichte der Kettenbrüche. Schul-Programm, Weissenburg 1872.
Paul du Bois-Reymond, Die allgemeine Functionentheorie. I (einz.). Tübingen 1882.
R. Reiff, Geschichte der unendlichen Reihen. Tübingen 1889.
Giulio Vivanti, Il concetto d'infinitesimo e la sua applicazione alla matematica. Mantova 1894.

Erster Teil. Irrationalzahlen und Grenzbegriff.

I. Irrationalzahlen.

1. Euklid's Verhältnisse und incommensurable Grössen. Die *Irrationalzahlen*, deren principielle Einführung eine der wesentlichsten Grundlagen der *allgemeinen Arithmetik* bildet, sind nichtsdestoweniger zunächst aus *geometrischen* Bedürfnissen erwachsen: sie erscheinen ursprünglich als Ausdruck für das *Verhältnis incommensurabler* (d. h. durch kein gemeinschaftliches Mass messbarer) *Streckenpaare* (z. B. der Diagonale und Seite eines Quadrats²⁾). In diesem Sinne kann das 5. Buch des *Euklid*, welches die *allgemeine* Theorie der „*Verhältnisse*“ entwickelt, sowie das von den *incommensurablen* Grössen handelnde 10. Buch als litterarischer Ausgangspunkt für die Lehre von den *Irrationalzahlen* angesehen werden. Immerhin behandelt *Euklid* naturgemäss nur ganz bestimmte mit *Zirkel und Lineal konstruierbare* (also, arithmetisch gesprochen, durch Quadratwurzeln dar-

1) Die sehr umfangreichen Abschnitte über *Reihen* in *S. F. Lacroix'* grossem Traité de calc. diff. et intégr. (3 Vols., 2^{de} éd., Paris 1810—1819) enthalten über die *elementare* Reihenlehre wenig brauchbares.

2) Dass die Diagonale und Seite eines Quadrats incommensurabel seien, soll schon *Pythagoras* erkannt haben; s. *M. Cantor*, Gesch. der Math. 1 (Lpz. 1880), p. 130. 154.

stellbare) *Irrationalitäten* in ihrer Eigenschaft als *incommensurable Strecken*³⁾; die Anschauung, dass das Verhältnis zweier solcher *spezieller* oder gar zweier *ganz beliebig* zu denkender *incommensurabler Strecken* eine *bestimmte* (irrationale) *Zahl definiere*, ist ihm, wie überhaupt den Mathematikern des Altertums, fremd geblieben⁴⁾.

2. **Michael Stifel's Arithmetica integra.** Aber auch für die Arithmetiker und Algebraisten des Mittelalters und der Renaissance sind die aus der Geometrie übernommenen *Irrationalitäten* noch keine „wirklichen“, sondern allenfalls *uneigentliche* oder *fingierte Zahlen*⁵⁾, die lediglich wie ein notwendiges Übel geduldet werden. Den ersten entscheidenden Schritt für eine richtigere Schätzung der Irrationalzahlen verdankt man wohl *Michael Stifel*, der im 2. Buche seiner *Arithmetica integra*⁶⁾ im Anschlusse an das 10. Buch des *Euklid* ausführlich von den „*Numeris irrationalibus*“⁷⁾ handelt. Wenn er sich auch zunächst noch der aus dem *Euklid* abstrahierten Ansicht anschliesst, dass die *irrationalen Zahlen keine „wirklichen“ Zahlen seien*⁸⁾,

3) Näheres darüber (ausser a. a. O. bei *Euklid*): *Klügel*, Math. W.-B. 2, p. 949. *M. Cantor* a. a. O. p. 230. *Schlömilch*, Ztschr. f. M. 34 (1889), Hist.-lit. Abth. p. 201.

4) *Euklid* sagt (Elem. X, 7) ganz ausdrücklich: Inkommensurable Grössen verhalten sich *nicht* wie Zahlen zu einander. — *Jean Marie Constant Duhamel* (Des méthodes dans les sciences de raisonnement, Paris 1865—70) hat versucht (a. a. O. 2, p. 72—75), die Euklidische Verhältnislehre für die Fundierung des allgemeinen Irrationalzahlbegriffs nutzbar zu machen. Doch verdirbt er schliesslich seine anfänglich richtige Methode durch unnötige Heranziehung eines unklaren geometrischen Grenzbegriffs. — Dagegen giebt *O. Stolz* (Allg. Arithm. 1, p. 35 ff), neben einer der heutigen Darstellungsweise angepassten Reproduktion der Euklidischen Verhältnislehre, die nötigen Andeutungen, wie die letztere zu einer einwandfreien Theorie der reellen Zahlen (insbesondere also auch der irrationalen) ausgestaltet werden könne. — Vgl. auch: *O. Stolz*, Grössen und Zahlen (Rektorsrede vom 2. März 1891, Lpz. 1891), p. 16; ferner: Nr. 13, Fussn. 84.

5) „*Numeri ficti*“, gewöhnlich als „*Numeri surdi*“ bezeichnet; diese dem *Leonardo von Pisa* (Liber abaci, 1202, zugeschriebene Benennung hat sich bis ins 18. Jahrhundert, in England („*Surds*“) bis auf die Gegenwart erhalten.

6) Nürnberg 1544. Fol. 103—223.

7) Die Bezeichnung „*radices surdae*“ gebraucht *Stifel* in einem engeren Sinne a. a. O. Fol. 134.

8) Die entgegengesetzte Angabe bei *C. J. Gerhardt* (Gesch. der Math. in Deutschl., München 1877, p. 69) scheint mir inkorrekt. Die betreffende Stelle bei *Stifel* (a. a. O. Fol. 103^a) lautet ganz unzweideutig: „Non autem potest dici numerus verus, qui talis est, ut praecisione careat et ad numerum verum nullam cognitam habet proportionem. Sicut igitur infinitus numerus non est numerus: sic irrationalis numerus non est verus numerus atque lateat sub quadam infinitatis nebula.“

so liegt hierin, wie der betreffende Zusammenhang lehrt, doch schliesslich nur eine von der heutigen verschiedene *Ausdrucksweise*, welche im Grunde nichts anderes besagt, als dass die *irrationalen Zahlen* eben *keine rationalen* sind. Dagegen dokumentiert *Stifel* seine mit den modernen Anschauungen *sachlich* im wesentlichen übereinstimmende Auffassung durch den Ausspruch, dass *jeder irrationalen Zahl* gerade so gut, wie *jeder rationalen* ein *eindeutig bestimmter Platz* in der geordneten Zahlenreihe zukomme⁹⁾. Damit erscheint in der That das wesentlichste Moment, welches die Irrationalitäten als *Zahlen* charakterisiert, zum ersten Male scharf hervorgehoben. Freilich sind hierbei unter Irrationalzahlen immer nur gewisse einfache *Wurzelgrößen* zu verstehen — eine Einschränkung, die sich teils aus der damals noch bestehenden Alleinherrschaft der *Euklidischen Methoden* in der *Geometrie* erklärt, teils aber auch aus dem Umstande, dass die Aufsuchung der n^{ten} Wurzel aus einer zwischen g^n und $(g+1)^n$ (g = ganze Zahl) gelegenen ganzen Zahl die *einzige* Aufgabe war, deren *Nichtlösbarkeit* durch eine *rationale Zahl* man damals wirklich *nachweisen* konnte¹⁰⁾.

3. Der Irrationalzahlbegriff der analytischen Geometrie. Erst der allmählich sich vollziehende Bruch mit der Geometrie der Alten, insbesondere die mit dem Erscheinen von *Descartes' Géométrie* (1637) beginnende Entwicklung der analytisch-geometrischen Methode, sodann die Erfindung der Infinitesimalrechnung durch *Leibniz* und *Newton* (1684; 1687) schuf das Bedürfnis, die Äquivalenz zwischen *Strecken* und *Zahlen* weiter auszubilden und den Irrationalzahlbegriff dementsprechend zu vervollständigen. Hatte schon *Descartes* beliebige *Streckenverhältnisse* mit *einfachen Buchstaben* bezeichnet und damit *wie mit Zahlen* gerechnet, so erscheint die Aussage, dass *jedem Verhältnis* zweier Quantitäten eine *Zahl* entspreche, an der Spitze von *Newton's Arithmetica universalis* (1707) geradezu als *Definition* der Zahl¹¹⁾. Und noch specieller an den geometrischen Begriff der

9) A. a. O. Fol. 103^b, Zeile 3 von unten: „Item licet infiniti numeri fracti cadeant inter quoslibet duos numeros immediatos, quemadmodum etiam infiniti numeri *irracionales* cadunt inter duos numeros integros immediatos. *Ex ordinibus tamen utrorumque facile est videre, ut nullus eorum ex suo ordine in alterum possit transmutare.*“

10) *Stifel* a. a. O. Fol. 103^b.

11) „*Numerum non tam multitudinem unitatum quam abstractam quantitatis cujusvis ad aliam ejusdem generis quae pro unitate habetur rationem intelligimus.*“ — Freilich erscheint, wie *Stolz* treffend bemerkt (Allg. Arithm. 1, p. 94), diese Definition bei *N.* nur als eine Art Paradesstück: für eine wirkliche

messbaren Grösse anknüpfend definiert *Chr. Wolf*, dessen in der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts überaus verbreiteten Lehrbücher trotz ihres Mangels an Originalität und schärferer Kritik immerhin als Ausdruck der damals von der grossen Majorität acceptierten Ansichten gelten können: „*Zahl* ist dasjenige, was sich zur Einheit verhält, wie eine gerade Linie zu einer gewissen anderen (Geraden“¹²). Die *Zahl* erscheint also als Ausdruck für das Resultat der *Messung* einer *Strecke* durch eine andere, welche die Rolle der *Einheitsstrecke* spielt — eine Anschauung, die bis in die neueste Zeit hinein zur einzig herrschenden wurde und auch noch heutzutage von einzelnen Mathematikern streng festgehalten wird. Jeder *Strecke* (oder auch — vermöge einer einfachen und bekannten Modifikation — jedem *Punkte* einer (Geraden) entspricht nunmehr eine bestimmte *Zahl*, nämlich entweder eine *rationale* oder eine *irrationale*, d. h. zunächst ein nach geeigneten Regeln (Euklidisches Verfahren zur Aufsuchung des grössten gemeinschaftlichen Masses¹³) oder unbegrenzte Unterteilung der messenden *Einheitsstrecke*) zu gewinnender *unbegrenzt fortsetzbarer Algorithmus in rationalen Zahlen* (unendlicher Kettenbruch, unendlicher Dezimalbruch); die *Berechtigung*, ein solches *unbegrenztes System von Rationalzahlen* als eine *einzig bestimmte Zahl* zu betrachten, wird dann ausschliesslich darin erblickt, dass dasselbe als *arithmetisches Äquivalent* einer *gegebenen Strecke* mit Hilfe derselben *Messungsmethoden* gefunden wird, welche für *andere* Strecken eine *bestimmte rationale Zahl* liefern. Daraus folgt nun aber *keineswegs*, dass man umgekehrt auch berechtigt ist, ein *beliebig vorgelegtes arithmetisches Gebilde* der bezeichneten Art in dem eben definierten Sinne als *Irrationalzahl* zu betrachten, d. h. die Existenz einer jenes Gebilde bei geeigneter Messung erzeugenden *Strecke* als *evident* anzusehen¹⁴). Dieser für die consequente Aus-

Ausbildung der Irrationalzahltheorie auf Grund der Euklidischen Verhältnislehre wird sie keineswegs ausgenützt. (Vgl. auch: *Stoll*, Zur Geometrie der Alten, Math. Ann. 22 [1888], p. 516.)

12) *Elementa Matheseos universae*. 1, Halae 1710: *Elementa Arithmeticae*, Art. 10. (Ich zitiere nach der mir vorliegenden zweiten Auflage von 1730)

13) *EucL. Elem.* X, 2, 3. *A. M. Legendre*, *Geometrie*, Livre III, Probl. 19.

14) Der oben citierte *Chr. Wolf* weiss hierüber nur folgendes zu sagen (a. O. Art. 296): „In geometria et analysi demonstrabitur, tales rationes, quae actu dari non possunt, esse ad unitatem ut rectam lineam ad rectam aliam, consequenter numeros eosque irracionales, cum ex hypothese rationales non sint.“ Das läuft doch schliesslich wieder darauf hinaus, dass von den *arithmetisch definierten Irrationalitäten* lediglich die *geometrisch konstruierbaren* als *Zahlen* zu betrachten sind. Dabei springt nun freilich W. mit dem Begriffe der *geometrischen Konstruierbarkeit* in der Weise leichtfertig um, dass er z. B. Parabeln be-

bildung des Irrationalzahlbegriffs fundamentale Punkt wurde bis in die neueste Zeit teils mit Stillschweigen übergangen, teils mit Hülfe angeblicher geometrischer Evidenzen abgethan oder durch metaphysische Redensarten über Stetigkeit, Grenzbegriff und Unendlichkleines mehr verdunkelt, als aufgeklärt.

4. Das Cantor-Dedekind'sche Axiom und die arithmetischen Theorien der Irrationalzahlen. *G. Cantor* hat wohl zuerst scharf hervorgehoben, dass die Annahme, *jedem* nach Art einer Irrationalzahl definierten *arithmetischen Gebilde* müsse eine bestimmte *Strecke* entsprechen, weder *selbstverständlich*, noch *beweisbar* erscheine, vielmehr ein wesentliches, rein *geometrisches Axiom* involviere¹⁵⁾. Und fast gleichzeitig hat *R. Dedekind* gezeigt, dass das fragliche *Axiom* (oder, genauer gesagt, ein ihm *gleichwertiges*) *derjenigen* Eigenschaft, welche man bisher *ohne jede zulängliche Definition* als *Stetigkeit* der geraden Linie bezeichnet hatte, erst einen *greifbaren Inhalt* giebt¹⁶⁾. Um die Grundlagen der allgemeinen *Arithmetik* von einem derartigen *geometrischen* Axiome völlig unabhängig zu machen, hat jeder der beiden genannten Autoren seine besondere *rein arithmetische* Theorie der Irrationalzahl entwickelt¹⁷⁾. Einer anderen, gleichfalls *rein arithmetischen* Einführungsart hatte sich schon seit längerer Zeit *K. Weierstrass* in seinen Vorlesungen über analytische Funktionen bedient¹⁸⁾. *Cantor*

liebig hoher Ordnung ohne weiteres als *konstruierbar* ansieht und diese sodann zur angeblichen Konstruktion von $\sqrt[m]{x}$ benützt! (a. a. O. Elementa Analyseos, Art. 630).

15) Math. Ann. 5 (1872), p. 128.

16) *Stetigkeit und irrationale Zahlen*. Braunschweig 1872. — Das betreffende Axiom erscheint daselbst in folgender Fassung: „Zerfallen alle Punkte der Geraden in zwei Klassen von der Art, dass *jeder* Punkt der *ersten* Klasse *links* von *jedem* Punkte der *zweiten* Klasse liegt, so existiert *ein* und *nur ein* Punkt, welcher diese Einteilung . . . hervorbringt.“

17) A. a. O. — Die *Cantor'sche* Theorie wurde ungefähr um dieselbe Zeit, wie von ihrem Verfasser selbst, auch von *E. Heine* (mit ausdrücklichem Hinweis auf mündliche Mitteilungen *Cantor's*) in etwas ausführlicherer Weise publiziert: J. f. Math. 74, p. 174 ff. — Dagegen hat *Ch. Méray* die Grundlagen dieser Theorie *unabhängig* von *Cantor* gleichfalls aufgefunden und ungefähr gleichzeitig mit *Cantor* und *Heine* veröffentlicht in seinem: Nouveau Précis d'Analyse infinitésimale, Paris 1872.

18) Die Grundprinzipien der *W.'schen* Theorie hat zuerst *H. Kossak* kurz mitgeteilt in einer Programmabhandlung des Werder'schen Gymnasiums, Berlin 1872 (p. 18 ff.). — Ausführlicheres findet man bei *S. Pincherle*, Giorn. di mat. 18 (1880), p. 185 ff. — *O. Biermann*, Theorie der analytischen Functionen, Leipzig 1887, p. 19 ff.

selbst hat im 21. Bande (1883) der Math. Ann. (p. 565 ff.) alle drei Definitionsformen einer kritischen Vergleichung unterzogen und bei dieser Gelegenheit seine erste Darstellung (wohl im Anschluss an die von Heine gegebene) einigermaßen modifiziert, derart, dass die Trennung der zu definierenden *Irrationalzahl* von jeglicher *Grenzvorstellung* noch schärfer zum Ausdruck kommt.

5. Die Theorien von Weierstrass und Cantor. Die Weierstrass'sche Theorie und die etwas bequemer zu handhabende Cantor'sche, welche man mit Heine¹⁹⁾ passend als eine glückliche Fortbildung der ersteren bezeichnen kann, knüpfen beide an eine bestimmte *formale Darstellung* der Irrationalzahlen an, als deren einfachster und jedermann geläufiger Typus diejenige durch *unendliche Dezimalbrüche* erscheint²⁰⁾. Während aber W. hiervon das Prinzip der *Summenbildung* als ausschliessliches *Erzeugungsmoment* beibehält, so entnimmt C. jenem Vorbilde den allgemeineren Begriff der sog. *Fundamentalreihe*, d. h. einer Reihe von rationalen Zahlen a_v , von der Beschaffenheit, dass $|a_v + \varrho - a_v|$ für einen *hinlänglich gross* gewählten Wert von v und *jeden* Wert von ϱ *beliebig klein* wird. *Wesentlich* ist sodann, dass die zu definierende *allgemeine reelle Zahl* (welche je nach Umständen eine *rationale* oder *irrationale* sein kann) *nicht* etwa als *Summe* einer „*unendlichen*“ Anzahl von Elementen oder als „*unendlich entferntes*“ Glied einer Reihe durch irgend welchen nebelhaften *Grenzprozess* gewonnen wird. Dieselbe erscheint vielmehr als ein fertiges, *neu geschaffenes Objekt*, oder, noch konkreter nach Heine²¹⁾, als ein *neues Zahlzeichen*, dessen *Eigenschaften* aus denjenigen der definierenden rationalen Elemente eindeutig festgestellt werden, dem ein *eindeutig bestimmter Platz* innerhalb des Gebietes der rationalen Zahlen angewiesen wird, und mit welchem nach bestimmten Regeln *gerechnet*²²⁾ werden kann. Die

19) A. a. O. p. 173.

20) Eine ausführliche Darstellung der Cantor'schen Theorie, welche zweckmässig die Lehre von den *systematischen Brüchen* (Verallgemeinerung der Dez.-Br.) zum Ausgangspunkte nimmt, findet man bei Stoll, *Allg. Arithm.* I, p. 97 ff.; eine andere, für den Anfänger gleichfalls nicht unzuverlässige Darstellung, bei welcher zur Definition der Irrationalzahlen und ihrer Rechnung operationen *zwei monotone* Zahlenfolgen (s. Nr. 13 dieses Artikels) dienen, giebt P. Bachmann, *Vorl. über die Natur der Irrationalzahlen* (Lpz. 1892, p. 6 ff.).

21) A. a. O. p. 173: „Ich stelle mich bei der Definition der Zahlen auf den rein formalen Standpunkt, indem ich gewisse *geograph. Zeichen* Zahlen nenne, so dass die Existenz dieser Zahlen also nicht in Frage steht.“ Anders Cantor: *Math. Ann.* 21 (1883), p. 553.

22) Vgl. *Pincherle* a. a. O. Art. 18, 28. *Biermann* a. a. O. p. 24. *Heine* a. a. O. p. 177. *Cantor*, *Math. Ann.* 5, p. 125; 21, p. 568.

auf diese Weise definierten *allgemeinen reellen Zahlen* sind natürlich zunächst *nicht* als Zeichen für bestimmte Quantitäten (zähl- oder messbare Grössen) anzusehen, und die für sie definierten Begriffe „grösser“ und „kleiner“ bezeichnen demgemäss keine *Quantitätsunterschiede*, sondern lediglich *Successionen*. Insbesondere erleidet hierbei also auch der Begriff der *rationalen Zahlen* eine *Erweiterung* in dem Sinne, dass sie als *Zeichen* erscheinen, denen in erster Linie lediglich eine *bestimmte Succession* zukommt²³⁾, und die wohl bestimmte *Quantitäten* vorstellen können, aber nicht müssen. Wird dieser entscheidende Punkt übersehen²⁴⁾, so erscheinen Einwendungen begreiflich, wie sie von *E. Illigens* gegen die Theorien von *Weierstrass* und *Cantor* mit Unrecht erhoben worden sind²⁵⁾. Dass im übrigen die *Weierstrass-Cantor'schen Zahlen* (einschliesslich der *irrationalen*) zur Darstellung bestimmter *Quantitäten* z. B. *Strecken* benützt werden können, ist von den Verfassern der betreffenden Theorien ausdrücklich gezeigt worden²⁶⁾: *jeder Strecke* entspricht (nach Fixierung einer beliebigen Einheitsstrecke) *eine und nur eine bestimmte Zahl*. Das *Umgekehrte* gilt natürlich wiederum nur für *rationale* und *spezielle irrationale Zahlen*; für *beliebige Irrationalzahlen* nur dann, wenn man das in Art. 4 erwähnte geometrische *Axiom* gelten lässt²⁷⁾.

6. Die Theorie von Dedekind. *Dedekind* definiert die *Irrationalzahl*, ohne direkte Benützung irgend eines arithmetischen Formalismus, mit Hülfe des von ihm eingeführten Begriffs des „*Schnittes*“²⁸⁾; darunter versteht er eine Scheidung aller Rationalzahlen in zwei Klassen von

23) Man kann, von diesem Begriffe der *eindeutigen Succession* ausgehend, zu einem *vollkommen einheitlichen* Aufbau der Zahlenlehre gelangen, wenn man von vornherein die *natürlichen Zahlen nicht*, wie üblich, auf Grund des Anzahlbegriffs als *Kardinalzahlen*, vielmehr (nach dem Vorgange von *H. Helmholtz* und *L. Kronecker*) als *Ordinalzahlen* einführt. Vgl. meinen Aufsatz Münch. Ber. 27 (1897), p. 325.

24) S. z. B. *R. Lipschitz*, Grundl. d. Anal., Abschnitt I, und vgl. meinen Vortrag: Über den Zahl- und Grenzbegriff im Unterricht. Jahresb. d. D. M.-V. 6 (1848), p. 78.

25) Math. Ann. 33 (1889), p. 155; desgl. 35, p. 451. Replik von *Cantor*: ebend. 33, p. 476. — Vgl. auch *Pringsheim*, Münch. Sitzber. 27, p. 322, Fussnote.

26) *Pincherle* a. a. O. Art. 19. *Cantor*, Math. Ann. 5, p. 127.

27) Bei *Pincherle*, dessen Darstellung der *W.'schen* Theorie freilich keineswegs als eine authentische angesehen werden kann, wird merkwürdiger Weise jenes *Axiom* (in der *Dedekind'schen* Form) wiederum als eine selbstverständliche Thatsache betrachtet (a. a. O. Art. 20).

28) A. a. O. § 4.

Individuen (a_1) und (a_2), so dass durchweg $a_1 < a_2$. Ist dann unter den Zahlen a_1 eine *grösste* oder unter den Zahlen a_2 eine *kleinste*, so ist die betreffende (*rationale*) Zahl gerade diejenige, welche den fraglichen *Schnitt* hervorbringt. Im andern Falle wird demselben ein *neues* *geschaffenes* Individuum α , eine *Irrationalzahl*, zugeordnet und als diesen *Schnitt* hervorbringend angesehen. Auf Grund dieser Definition lassen sich sodann die Beziehungen dieser neuen Zahlen α untereinander und zu den rationalen Zahlen a , sowie die elementaren Rechenoperationen eindeutig feststellen, wie *D.* selbst im wesentlichen durchgeführt hat. Eine ausführlichere Darstellung in mehr *geometrischem* Gewande hat *M. Pasch* in seiner „Einleitung in die Differential- und Integral-Rechnung“ gegeben²⁹⁾ und dieser später einige Modifikationen hinzugefügt³⁰⁾, welche die in Wahrheit doch wesentliche *arithmetische* Grundlage jener Theorie deutlicher hervortreten lassen.

Gerade dadurch, dass die *Dedekind'sche* Einführungsart der Irrationalzahlen an keinerlei arithmetischen Algorithmus anknüpft, gewinnt sie den Vorzug einer ganz besonderen Kürze und Prägnanz. Aus dem nämlichen Grunde erscheint sie aber auch merklich abstrakter und schliesst sich dem Kalkül weniger bequem an, als die *Cantor'sche*. Nicht unzumuthig hat daher *J. Tannery* in seiner „Introduction à la Théorie des Fonctions“³¹⁾ eine Darstellung gewählt, welche von der *Dedekind'schen* Definition ausgehend weiterhin durch Heranziehung der *Cantor'schen Fundamentalreihen* an dessen Theorie Anschluss gewinnt.

7. Du Bois-Reymond's Kampf gegen die arithmetischen Theorien. Der Trennung des *Zahl*-Begriffs von demjenigen der *messbaren* Grösse, wie sie durch die arithmetischen Theorien der Irrationalzahlen statuiert wird, ist insbesondere *P. Du Bois-Reymond* mit Entschiedenheit

29) Leipzig 1882, §§ 1—3.

30) Math. Ann. 40 (1892), p. 149.

31) Paris 1886, Chap. 1. — Übrigens begehrt *Tannery* einen Irrthum, wenn er (p. IX) den eigentlichen Grundgedanken der *Dedekind'schen* Theorie *J. Bertrand* (Traité d'Arithmétique) zuschreibt, wie *Dedekind* mit Recht in der Vorrede seiner Schrift: „Was sind und was sollen die Zahlen?“ hervorgehoben hat (p. XIV). *Bertrand* benützt die beiden im Texte mit a_1 , a_2 bezeichneten Klassen thatsächlich nur, ganz wie die älteren Mathematiker, um *unabhängigen* Darstellung der *Irrationalzahl*; ihre Definition knüpft er keineswegs an den ihm fremden Begriff des *Schnittes*, sondern durchaus an denjenigen der *messbaren* Grösse (s. a. a. O. 11. Aufl., 1895, Art. 270. 313), und er umgeht stillschweigend für die Begründung der Addition und Multiplikation der Irrationalzahlen (Art. 314. 315) das Axiom des Art. 4.

heit entgegengetreten³²⁾. In seiner „Allgemeinen Funktionentheorie“ (Tübingen 1882) verwirft er dieselbe als formalistisch, die Analysis zu einem blossen Zeichenspiele herabwürdigend³³⁾, und betont aus historischen und philosophischen Gründen den untrennbaren Zusammenhang der *Zahl* mit der *messbaren* oder, wie er sie nennt, „*lineären*“ *Grösse*. Dabei reduziert er die in dem *Axiome* des Art. 4 enthaltene *Forderung* auf *diejenige* der *Decimalbruchgrenze*, d. h. der *Existenz* einer bestimmten *Strecke*, welche (in dem oben — Nr. 3 — näher erörterten Sinne) einem beliebig vorgelegten *unendlichen Dezimalbruche* entspricht³⁴⁾. Er sieht nun diese Aussage nicht ohne weiteres als ein *Axiom* an, sondern untersucht, in wieweit sich dieselbe durch Betrachtungen wesentlich psychologischer Natur begründen lasse. Über den *erkenntnistheoretischen* Wert dieser Auseinandersetzung³⁵⁾ wird an späterer Stelle zu berichten sein³⁶⁾. Für den *Mathematiker* kommt dabei schliesslich kaum etwas anderes heraus, als dass er die fragliche Forderung als *Axiom* gelten lassen muss, wenn er die Lehre von den *Irrationalzahlen* auf *diejenige* von den *messbaren Grössen* begründen will. Es ist dies der Standpunkt, den in neuester Zeit *G. Ascoli* gegenüber den arithmetischen Irrationalzahltheorien als den ihm einzig natürlich erscheinenden hervorgehoben hat³⁷⁾. Immerhin dürfte sich heutzutage die bei weitem grosse Mehrzahl der wissenschaftlichen Mathe-

32) *Herm. Hankel* (Theorie der complexen Zahlensysteme) schrieb schon 1867, also zu einer Zeit, wo ihm höchstens die *Weierstrass'sche* Theorie durch mündliche Mitteilung bekannt sein konnte, folgendes (a. a. O. p. 46): „Jeder Versuch, die irrationalen Zahlen formal und ohne den Begriff der Grösse zu behandeln, muss auf höchst abstruse und beschwerliche Künsteleien führen, die, selbst wenn sie sich in vollkommener Strenge durchführen liessen, wie wir gerechten Grund haben zu bezweifeln, einen höheren wissenschaftlichen Wert nicht haben.“ Es erscheint äusserst merkwürdig, dass gerade der Schöpfer einer *rein formalen Theorie der Rationalzahlen* für die entsprechende Weiterbildung des Zahlbegriffs so wenig Verständnis gezeigt hat.

33) A. a. O. Art. 18.

34) Diese Forderung reicht in der That hin, da sich jede beliebige, arithmetisch definierte Irrationalzahl als systematischer Bruch mit beliebiger Basis darstellen lässt, s. Nr. 9, Fussnote 48.

35) A. a. O. p. 1—168.

36) VI A 2 a, 3 a.

37) Rend. Ist. Lomb. (2) 28 (1895), p. 1060. — *A.* formuliert dabei jenes Axiom folgendermassen: „Liegt von den Segmenten $\overline{a_1 b_1}$, $\overline{a_2 b_2}$, $\overline{a_3 b_3}$, ... jedes ganz im Innern des vorhergehenden und ist $\lim_{n=\infty} \overline{a_n b_n} = 0$, so giebt es *stets* einen und *nur einen* Punkt, der im Innern aller dieser Segmente liegt.“

matiker einer der rein *arithmetischen* Definitionsformen der Irrationalzahlen angeschlossen haben und somit einer *Trennung* der *reinen Zahlenlehre* von der *eigentlichen Grössenlehre* zustimmen³⁸⁾. Die Einführung jenes *Axioms* wird bei dieser Auffassung erst erforderlich, wenn es sich darum handelt, die innerhalb der *reinen Arithmetik* ohne seine Mitwirkung zu Recht bestehenden Ergebnisse in die *Raumanschauung* zu übertragen³⁹⁾.

8. Die vollkommene Arithmetisierung im Sinne Kronecker's.

Während die Anhänger der eben bezeichneten „arithmetisierenden“ Richtung sich damit begnügen, die *Definition* der *Irrationalzahlen* und der damit auszuführenden Rechnungsoperationen auf die Lehre von den *rationalen*, also schliesslich von den *ganzen Zahlen* zu begründen, hat *Kronecker* einen wesentlich höheren Grad von „*Arithmetisierung*“ der gesamten Zahlenlehre (Arithmetik, Analysis, Algebra) als erstrebenswertes und nach seiner Meinung auch erreichbares Ziel hingestellt⁴⁰⁾. Darnach sollen die arithmetischen Disciplinen alle „*Modifikationen und Erweiterungen des Zahlbegriffs*“ (ausser demjenigen der natürlichen Zahl) *wieder abstreifen*“, insbesondere sollen also die *Irrationalzahlen* endgültig daraus verbannt werden. Dass es je dahin kommen werde, scheint mir nicht gerade wahrscheinlich⁴¹⁾. Denn beachtet man, was *Kronecker* a. a. O. zur Beseitigung der *negativen* und *gebrochenen*⁴²⁾, sowie der *algebraischen Zahlen* vorschlägt, so gewinnt man den Eindruck, dass die fragliche *vollkommene Arithmetisierung* jener Disciplinen darauf hinauslaufen würde, deren wohlerprobte Ausdrucksweise und Zeichensprache, welche äusserst *verwickelte* Relationen zwischen *natürlichen Zahlen* in kürzester und vollkommen präziser Weise *zusammenfasst*, in einen höchst weitläufigen und schwerfälligen Formalismus *aufzulösen*.

38) Vgl. auch *Helmholtz*, Ges. Abh. 3, p. 359.

39) Vgl. *F. Klein*, Math. Ann. 37 (1850), p. 572.

40) J. f. Math. 101, p. 338. — Das inzwischen zum *Terminus technicus* gewordene Schlagwort „*Arithmetisierung*“ ist wohl von *K* zuerst gebraucht worden.

41) Vgl. meinen oben citierten Aufsatz: Münch. Sitzber. 27, p. 323, Fussnote. Ferner: *E. B. Christoffel*, Ann. di Mat. (2) 15 (1887), p. 233. Der Inhalt dieses Aufsatzes ist im übrigen wesentlich zahlentheoretischer Natur.

42) Die von *Kronecker* benützte, auf dem arithmetischen Begriffe der *Kongruenz* beruhende Methode ist übrigens genau dieselbe, welche schon von *Cauchy* zur Beseitigung der *imaginären Zahlen* entwickelt wurde: Exerc. d'anal. et de phys. math. 4 (1847), p. 87. Vgl. IA 2, Nr. 3.

9. Verschiedene Darstellungsformen der Irrationalzahlen und Irrationalität gewisser Darstellungsformen. Den einfachsten Typus von *Zahlreihen* zur *Darstellung der Irrationalzahlen* bilden die unendlichen, d. h. unbegrenzt fortsetzbaren *systematischen Brüche*⁴³⁾. Schon bei *Theon von Alexandria*⁴⁴⁾ findet sich eine Methode zur angenäherten Berechnung der Quadratwurzeln mit Hilfe von *Sexagesimal-Brüchen*. Die letzteren blieben auch noch im Mittelalter ausschliesslich in Gebrauch und wurden erst seit dem 16. Jahrhundert allmählich durch die *Dezimal-Brüche* verdrängt⁴⁵⁾. Statt der in der Praxis jetzt allgemein üblichen *Dezimal-Brüche* erweisen sich die *dyadischen*⁴⁶⁾, wegen ihrer ausserordentlichen formalen Einfachheit und besonderen geometrischen Anschaulichkeit, für die Zwecke analytischer Beweisführung als vorzugsweise geeignet.

Die *nicht-periodischen* unendlichen Dezimalbrüche dürfen als die ersten arithmetischen Darstellungsformen gelten, deren *Irrationalität* man (auf Grund der eindeutigen Darstellbarkeit jedes *rationalen* Bruches durch einen allemal *periodischen* unendlichen Dezimalbruch⁴⁷⁾) ausdrücklich erkannt hat. Dass umgekehrt *jede* Irrationalzahl durch einen unendlichen Decimalbruch (bezw. systematischen Bruch mit beliebiger Basis) eindeutig darstellbar ist, wurde von *Stolz* allgemein bewiesen⁴⁸⁾.

Eine zweite fundamentale Darstellungsform der Irrationalzahlen, nämlich durch unendliche *Kettenbrüche*⁴⁹⁾ knüpft gleichfalls an das Problem der Quadratwurzelauszuehung an. Die Berechnung einer Quadratwurzel mit Hilfe eines unbegrenzt fortsetzbaren *regelmässigen Kettenbruches*⁵⁰⁾ lehrte zuerst (freilich nur an *Zahlen-Beispielen*) *Pietro*

43) Eine ausführliche Theorie derselben bei *Stolz*, Allg. Arithm. 1, p. 97 ff.

44) Um 360 n. Chr. *M. Cantor*, 1, p. 420.

45) Vgl. *M. Cantor*, 2, p. 252. 565—569. — *Siegm. Günther*, Verm. Unters. zur Gesch. der math. Wissensch. (Leipzig 1876), p. 97 ff.

46) Auf die Vorzüge des dyadischen Systems hat u. a. *Leibniz* besonders aufmerksam gemacht: Mém. Par. 1703. (Opera omnia, Ed. Dutens, 3, p. 390.)

47) *Joh. Wallisii* de Algebra Tractatus (1693), Cap. 80.

48) A. a. O. p. 119.

49) In Wahrheit wäre diese Darstellungsform durch den geometrischen Ursprung der Irrationalzahl als Verhältnis *incommensurabler* Strecken und durch die Euklidische Methode zur Feststellung der Commensurabilität bezw. Incommensurabilität (Elem. X 2, 3) unmittelbar angezeigt gewesen. Die historische Entwicklung hat indessen einen anderen Gang genommen.

50) D. h. eines solchen, dessen Teilzähler durchweg = 1, dessen Teilnenner natürliche Zahlen sind.

*Cataldi*⁵¹⁾, welcher darnach überhaupt als *Erfinder der Kettenbrüche* anzusehen ist⁵²⁾. Das von *Cataldi* aufgefundene *rein numerische* Verfahren erscheint unter der Form einer *allgemeinen analytischen Methode* bei *Leonhard Euler*, dem man die erste zusammenhängende Theorie der Kettenbrüche verdankt. Schon in seiner ersten Abhandlung⁵³⁾ über diesen Gegenstand zeigt er u. a. folgendes: Jeder *rationale* Bruch lässt sich durch einen *endlichen*, jeder *irrationale* durch einen *unendlichen regelmässigen* Kettenbruch darstellen. Insbesondere liefert die Entwicklung einer *Quadratwurzel* stets einen *periodischen* regelmässigen Kettenbruch; umgekehrt genügt jeder convergente Kettenbruch dieser Gattung einer *quadratischen* Gleichung mit ganzzahligen Coefficienten⁵⁴⁾. Sodann werden die Zahlen e , $\frac{e^2 - 1}{2}$ u. a. durch Kettenbrüche dargestellt⁵⁵⁾ — zunächst freilich *rein numerisch* (d. h. indem näherungsweise gesetzt wird: $e = 2,71828182845904$). Das auf diesem Wege durch blosse *Induktion* gefundene Gesetz für die Bildungsweise der *unendlichen* Kettenbrüche wird aber hierauf auch *analytisch* wirklich bewiesen: damit hat in der That *Euler* die *Irrationalität* von e und e^2 zum ersten Male festgestellt⁵⁶⁾.

Mit Hilfe allgemeinerer Kettenbruch-Entwicklungen gelang es sodann *Joh. Heinr. Lambert*⁵⁷⁾, die *Irrationalität* von e^x , $\tan x$ und somit auch von $\lg x$, $\arctan x$ für *jedes rationale* x , insbesondere⁵⁸⁾ also diejenige von π ($= 4 \arctan 1$) nachzuweisen⁵⁶⁾. Eine Abkürzung dieser Beweise und zugleich ein allgemein nützliches Hilfsmittel zur Erkenntnis

51) Trattato del modo brevissimo di trovare la radice quadra delli numeri. Bologna 1613.

52) Auch die heutige *Bezeichnung* der Kettenbrüche (sowohl die gewöhnliche, als auch die gedrängtere, vgl. Fussn. 338) findet sich schon bei C , mit dem einzigen Unterschiede, dass er & statt + (bezw. · & statt +) schreibt (so z. B. a. a. O. p. 70). Die Annahme, dass schon die Griechen, insbesondere *Archimedes* und *Theon von Smyrna* (um 130 n. Chr.), die Berechnung von Quadratwurzeln mit Hilfe von Kettenbrüchen im Principe gekannt hätten, beruht lediglich auf Konjekturen. Vgl. *M. Cantor*, I, p. 272. 369.

53) De fractionibus continuis. Comment. Petrop. 9 (1737), p. 98.

54) Dieser Satz bildet bekanntlich die Grundlage wichtiger Untersuchungen in der Theorie der quadratischen Formen (*Euler*, *Lagrange*, *Legendre*, *Dirichlet*, s. I C 2) und der numerischen Auflösung algebraischer Gleichungen (*Lagrange*, s. I B 3 a).

55) Die Bezeichnungen e und π stammen von *Euler*, vgl. *F. Rudio*, *Archimedes*, *Huygens*, *Lambert*, *Legendre*. Leipzig 1892, p. 53.

56) Vgl. meine Note in den Münch. Sitzber. 1898, p. 325.

57) Hist. de l'Acad. de Berlin, Année 1761 (gedruckt 1768), p. 265.

58) A. a. O. p. 297.

des Irrationalen lieferte *Legendre's* Satz von der *Irrationalität* eines jeden unendlichen Kettenbruches:

$$\frac{a_1}{b_1} \pm \frac{a_2}{b_2} \pm \dots \pm \frac{a_v}{b_v} \pm \dots,$$

für den Fall, dass die $\frac{a_v}{b_v}$ gewöhnliche ächte Brüche sind⁵⁹). Mit Benützung dieses Satzes dehnte zunächst *Legendre* den Irrationalitätsbeweis noch auf π^2 aus. Auch beruht darauf z. B. der von *G. Eisenstein*⁶⁰) gegebene Beweis für die Irrationalität gewisser in der Theorie der elliptischen Funktionen vorkommender Reihen und Produkte, wie:

$$\sum_1^\infty \frac{1}{p^{v^2}}, \quad \sum_1^\infty \frac{(-1)^{v-1}}{p^{v^2}}, \quad \sum_1^\infty \frac{r^v}{p^{v^2}}, \quad \prod_1^\infty \left(1 - \frac{1}{p^v}\right),$$

(wo p eine ganze, r eine rationale positive Zahl)⁶¹).

10. Fortsetzung. Die Ausdehnung des *binomischen* Satzes auf *gebrochene* Exponenten⁶²) lehrte die Wurzeln eines beliebigen Grades durch unendliche Reihen darstellen und lieferte damit zugleich den ersten allgemeinen Reihentypus von *unmittelbar* erkennbarer Irrationalität. Er scheint lange Zeit der einzige dieser Gattung geblieben zu sein. Der in die meisten Lehrbücher übergegangene *direkte* Beweis für die Irrationalität der bekannten *e-Reihe* rührt erst von *J. Fourier* her⁶³). Durch Anwendung eines ganz analogen Beweisverfahrens zeigte *Stern*⁶⁴) die Irrationalität der Reihe: $\sum p^{-v} q^{-m_v}$, (wo p, q natürliche Zahlen, (m_v) eine unbegrenzte Folge natürlicher Zahlen, für welche $m_{v+1} - m_v$ mit v ins Unendliche wächst) und: $\sum \pm (p_1 p_2 \dots p_v)^{-1}$ (wo p_1, p_2, p_3, \dots eine unbegr. Folge wachsender natürlicher Zahlen), sowie einiger ähnlicher, etwas allgemeinerer Reihen und damit äquivalenter unendlicher Produkte.

59) *Éléments de géométrie* (1794), Note IV. (Auch abgedruckt in der oben citierten Schrift von Rudio p. 161.) Vgl. Nr. 49.

60) *J. f. Math.* 27 (1843), p. 193; 28 (1844), p. 39.

61) Die weiteren Untersuchungen in dieser Richtung beschäftigen sich wesentlich mit der Scheidung der Irrationalitäten in *algebraische* und *transcendente*. Hierüber (speziell auch über die *Transcendenz* von e und π) s. IC 2.

62) Um 1666 durch *Newton* (Brief an Oldenburg vom 24. Okt. 1676 — s. *Opuscula*, Ed. Castillionneus, 1 (1644), p. 328). *N.* fand den fraglichen Satz lediglich durch Induktion. Den ersten strengen, rein elementaren Beweis (d. h. ohne Anw. der Diff.-R.) gab *Euler*: *Nov. Comment. Petrop.* 19 (1774), p. 103.

63) Nach *Stainville*, *Mélanges d'analyse* (1815), p. 339.

64) *J. f. Math.* 27 (1843), p. 193; 28 (1844), p. 39.

*W. L. Glaisher*⁶⁵⁾ machte darauf aufmerksam, dass man die Irrationalität der von *Eisenstein* betrachteten Reihen $\sum p^{-v^2}$, $\sum (-1)^{v-1} p^{-v^2}$ und der allgemeineren: $\sum n_v \cdot p^{-m_v}$ (wo m_v, n_v gewissen Bedingungen genügende nat. Zahlen) ganz unmittelbar erkennt, wenn man dieselben als *systematische* (offenbar *nicht-periodische*) *Brüche* mit der Basis p auffasst. Auch weist er mit Hilfe von Kettenbruch-Entwickelungen die Irrationalität verschiedener anderer Reihen nach, die im wesentlichen mit den von *Stern* behandelten zusammenfallen.

Eine der Exponentialreihe nachgebildete, eindeutige Darstellung jeder ächt-gebrochenen Irrationalzahl durch die Reihe $\sum_{v=1}^{\infty} \frac{m_v}{v!}$ (wo m_v eine natürliche Zahl $< v$) hat *Cyp. Stéphanos* angegeben⁶⁶⁾; die Summe der Reihe liefert dabei eine *rationale* Zahl dann und nur dann, wenn von irgend einem bestimmten v ab durchweg $m_v = v - 1$. Übrigens erscheint diese Darstellung nur als ein spezieller Fall einer schon früher von *G. Cantor* gegebenen⁶⁷⁾. Eine andere ebenfalls eindeutige Darstellung *aller* zwischen 0 und 1 gelegenen Zahlen durch Reihen von der Form:

$$\frac{1}{m_1 + 1} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{m_1(m_1 + 1) \cdots m_i(m_i + 1)}$$

rührt von *J. Lüroth* her⁶⁸⁾. Die *rationalen* Zahlen liefern stets *periodische*, die *irrationalen* dagegen *nichtperiodische* Reihen dieser Art — *vice versa*.

Hierher gehört schliesslich noch eine von *G. Cantor*⁶⁹⁾ mitgeteilte eindeutige Darstellung *aller* über 1 liegenden Zahlen durch unend-

liche Produkte von der Form: $\prod_{i=1}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{m_i}\right)$, wo die m_i nat. Zahlen und $m_{v+1} \geq m_v^2$. Dabei sind die *irrationalen* Zahlen dadurch charakterisiert, dass für unendlich viele Werte von v : $m_{v+1} > m_v^2$, während bei jeder *rationalen* Zahl von einem gewissen Werte v an durchweg die Beziehung $m_{v+1} = m_v^2$ besteht⁷⁰⁾.

65) Philosophical Magazine 45 (London 1873), p. 191.

66) Bull. de la S. M. d. F. 7 (1879), p. 81. — Eine funktionentheoretische Anwendung dieser Darstellungsweise bei *G. Darboux*, Ann. de l'École norm. (2), 7 (1879), p. 200.

67) Z. f. Math. 14 (1869), p. 124.

68) Math. Ann. 21 (1883), p. 411. — Dasselbe gibt L. auch je eine Anwendung auf Funktionentheorie und Mengenlehre.

II. Grenzbegriff.

11. Der geometrische Ursprung des Grenzbegriffs. Der zum Irrationalzahlbegriffe in engster Beziehung stehende allgemeinere Begriff der *Grenze* oder des *Grenzwertes* einer irgendwie definierten, der Anzahl nach unbegrenzten *Zahlenmenge* ist aus dem schon von *Euklid* und *Archimedes* benützten Prinzip der *Exhaustion*⁷¹⁾ in Verbindung mit der erst der neueren Zeit angehörigen Anwendung des *Unendlichen* hervorgegangen. Das *Exhaustions*-Prinzip erscheint bei den Alten unter der Form eines zur Vergleichung von Flächen und Körpern dienlichen rein *apagogischen* Beweisverfahrens, dessen Kern folgendermassen formuliert werden kann⁷²⁾: „Zwei geometrische Grössen A, B sind einander gleich, falls sich zeigen lässt, dass bei Annahme $A > B$ der Unterschied $A - B$, und bei der Annahme $A < B$ der Unterschied $B - A$ kleiner wäre als jede mit A, B gleichartige Grösse.“ Die Auffassung eines von einer stetig gekrümmten Linie oder Fläche begrenzten Raumgebildes als eines Polygons bzw. Polyeders mit „unendlich vielen“ und „unendlich kleinen“ Seiten findet sich schwerlich vor dem 16. Jahrhundert. Auch hier darf wohl der oben bereits citierte *M. Stifel* als der erste gelten, welcher den *Kreis* als ein *Unendlich-Vieleck* und, noch genauer, gewissermassen als *letztes* (also nach unserer Ausdrucksweise als „*Grenze*“) aller möglichen Polygone mit endlicher Seitenzahl definierte⁷³⁾. Während er aber gerade hieraus auf die *Unmöglichkeit* schloss, das Verhältnis von Peripherie und Durchmesser durch eine *rationale* oder *irrationale* Zahl darzustellen^{73a)}, so gelangte *Joh. Kepler*, von analogen Anschauungen

als deren erstes Beispiel die bekannte *Wallis'sche* Formel für $\frac{\pi}{2}$ erscheint (s. Nr. 41 Gl. [52]), gab *Ch. A. Vandermonde*, Mém. de l'Acad., Paris 1772. (In der deutschen Ausgabe von V.'s *Abhandl.* aus der reinen Math. [Berlin 1888], p. 67.)

71) Vgl. Art. „*Exhaustion*“ in *Klügel's* W. B., 2, p. 152. — Eine kritischere Darstellung giebt *Hermann Hankel* in *Ersch und Gruber's* Encyklopädie, Sect. I, Bd. 90, Art. „*Grenze*“.

72) *Stolz*, Zur Geometrie der Alten. Math. Ann. 22 (1883), p. 514. Allg. Arithm. I, p. 24.

73) A. a. O. Fol. 224^a. Def. 7. 8: „Recte igitur describitur circulus mathematicus esse polygonia infinitorum laterum. Ante circulum mathematicum sunt omnes polygoniae numerabilium laterum, quemadmodum ante numerum infinitum sunt omnes numeri dabiles.“

73^a) A. a. O. Fol. 224^b. Def. 12. Beachtet man, dass *Stifel* den *allgemeinen* Irrationalzahlbegriff noch nicht hatte (cf. Nr. 2), so darf der obige anscheinend falsche Schluss nicht nur als vollkommen logisch, sondern geradezu als ein charakteristisches Zeichen des *Stifel'schen* Denkens angesehen werden.

ausgehend, zu brauchbaren Formeln für die *Kubatur* von Rotationskörpern⁷⁴⁾. Kurze Zeit darauf erschien *Bonav. Cavalieri's Geometrie der Indivisibilen*⁷⁵⁾, welche, erheblich über *Kepler's* Spezialuntersuchungen hinausgehend, unbeschadet der einigermaßen mystischen Natur jener „Indivisibilen“ als die erste grundlegende Darstellung einer allgemeinen wissenschaftlichen Exhaustionsmethode angesehen zu werden pflegt⁷⁶⁾.

12. Die Arithmetisierung des Grenzbegriffs. Zu einer arithmetischen Formulierung des Grenzbegriffs, wie sie im wesentlichen heute noch üblich ist, gelangte *John Wallis*⁷⁷⁾, indem er, das umständliche *apagogische* Verfahren der Alten verlassend, *Cavalieri's direkte geometrische* Methode ins *Arithmetische* übersetzte — dem Sinne nach und in heutiger Ausdrucksweise etwa folgendermassen:

Eine Zahl a gilt als *Grenze* einer unbegrenzt fortsetzbaren Zahlenreihe a_v ($v = 0, 1, 2, \dots$ in inf.), wenn die Differenz $a - a_v$ mit hinlänglich wachsenden Werten von v beliebig klein⁷⁸⁾ wird.

Diese *Definition*, welche die *arithmetische* Beziehung jener *Grenze* a zu den Zahlen a_v vollkommen fixiert, sobald die Zahl a bekannt ist oder zum mindesten ihre *Existenz* von vornherein feststeht, liefert aber noch *kein Kriterium*, um eventuell aus der Beschaffenheit der Zahlen a_v auf die *Existenz* einer Grenze schliessen zu können. In dieser Hinsicht nahm man immer wieder seine Zuflucht zu *geometrischen* Vorstellungen und Analogien, aus denen man dann ohne weiteres die *Existenz* der fraglichen Grenze folgern zu können glaubte⁷⁹⁾. So z. B. sah man bei der *Quadratur* krummlinig begrenzter Ebenen-

scharfen Denkweise *Stifel's* gelten. Jener Schluss stimmt nämlich vollkommen mit unserer heutigen Ansicht überein, dass die *Rektifikation* einer krummen Linie ohne den allgemeinen Irrationalzahlbegriff überhaupt nicht definiert werden kann. Vgl. Nr. 11. 12.

74) *Nova stereometria doliorum*. Linz 1615. (Vgl. *M. Chasles*, Histoire de la Géométrie (2^{de} éd. 1875), p. 56. *M. Cantor*, Gesch. der Math. 2, p. 750.)

75) *Geometria indivisibilibus continuorum nova quadam ratione promota*. Bologna 1635. (Ausführliches darüber bei *Klügel*, 1, Art. „*Cavalieri's Methode des Untheilbaren*“. *M. Cantor* a. a. O. p. 759.)

76) *H. Hankel* a. a. O. p. 189. *Chasles* a. a. O. p. 57.

77) *Arithmetica Infinitorum* (1655), Prop. 43, Lemma. (In der Gesamtausgabe der *W.'schen* Werke — Opera omnia, Oxoniae, 1695. 1, p. 383.) Vgl. *M. Cantor*, 2, p. 823.

78) „Quolibet assignabili minor.“ L. c. Prop. 40.

79) Ich übergehe hier wiederum absichtlich alle Versuche, den Grenzbegriff erkenntnistheoretisch und psychologisch zu begründen, als in die *Philosophie* der

stücke, bei der *Rektifikation* von Kurvenbögen (mit Hilfe der Quadratur bez. Rektifikation einer Reihe unbegrenzt angenäherter Polygone) die *Existenz* einer bestimmten *Flächen-* bzw. *Längenzahl* als etwas *selbstverständliches*, auf Grund der *geometrischen Anschauung a priori* vorhandenes an⁸⁰⁾. Die *entscheidende Wendung* zur Beseitigung dieser unzulänglichen Auffassung bezeichnet *Cauchy's* Definition und Existenzbeweis⁸¹⁾ für das *bestimmte Integral* einer stetigen Funktion; hiermit wird in der That nicht nur zum ersten Male die *Notwendigkeit* deutlich gemacht, die *Existenz* einer *Flächenzahl* ausdrücklich *arithmetisch* zu beweisen, sondern dieser Nachweis *wenigstens in der Hauptsache* wirklich geliefert — d. h. es wird gezeigt, dass zur Definition jener *Flächenzahl* *Zahlenreihen* vorhanden sind, welche das zur *Existenz* einer bestimmten *Grenze* erforderliche (sogleich noch näher zu erörternde) *Kriterium* erfüllen⁸²⁾. Fehlt auch bei *Cauchy* (und zwar nicht nur an der betreffenden Stelle, sondern überhaupt in seinen Arbeiten) der *Beweis* dafür, dass jenes *Kriterium* für die Existenz einer bestimmten *Grenze* thatsächlich *hinreicht*, so kann man doch sagen, dass durch *Cauchy's* genannte Leistung die wahre *arithmetische* Natur des allgemeinen Grenzproblems zum ersten Male scharf gekennzeichnet und für dessen endgültige Erledigung der Weg gewiesen worden ist.

13. Das Kriterium für die Grenzwertexistenz. Das erwähnte *Kriterium* für die Existenz einer bestimmten *Grenze* lautet in seiner *Grundform*, d. h. für eine einfache, unbegrenzt fortsetzbare Reihe reeller Zahlen (einfach-unendliche *Zahlenfolge*, einfach-*abzählbare* ⁸³⁾

80) In der Stereometrie tritt die analoge Schwierigkeit schon bei der Kubatur der *Pyramide* auf; vgl. *R. Baltzer*, Die Elemente der Mathematik 2 (1883), p. 229. *Stolz*, Math. Ann. 22 (1883), p. 517.

81) Beides findet sich schon in dem „Résumé des leçons données à l'école polytechnique sur le calcul infinitésimal“ (Paris 1823), p. 81 (nicht erst, wie häufig angenommen wird, in den von *M. Moigno* 1840—44 herausgegebenen „Leçons sur le calcul différentiel et intégral“ 2, p. 2).

82) Zur vollen Strenge des Beweises wäre noch die Erkenntnis von der *gleichmässigen* Stetigkeit einer schlechthin stetigen Funktion erforderlich — was aber in dem hier vorliegenden Zusammenhange nicht wesentlich ins Gewicht fällt. Vgl. II A 1.

83) Vgl. I A 5, Nr. 2. — In dem vorliegenden Artikel wird im wesentlichen immer nur von den *Grenzwerten abzählbarer Zahlenmengen* gehandelt, da die Grenzwerte *nichtabzählbarer*, insbesondere *stetiger Zahlenmengen* (vgl. I A 5, Nr. 2. 13. 16) der *Analysis* (II A B) angehören. Natürlich lässt sich diese Th.

Zahlenmenge) und im Anschluss an die oben gegebene *Definition* der *Grenze* folgendermassen:

Damit die unbegrenzte Zahlenfolge (a_v) eine bestimmte *Grenze* (einen bestimmten *Grenzwert* oder *Limes*) a besitze, in Zeichen⁸⁴⁾:

$$a = \lim a_v \quad (v = \infty) \quad \text{oder:} \quad \lim_{v=\infty} a_v = a,$$

ist *notwendig* und *hinreichend*, dass $a_{n+q} - a_n$ für einen *hinlänglich grossen* Wert von n und *jeden* Wert von q *beliebig klein* wird⁸⁵⁾.

Die Zahlenfolge (a_v) heisst alsdann *konvergent*.

Dass die obige Bedingung eine *notwendige* ist, folgt unmittelbar aus der *Definition* der *Grenze* und mag wohl bekannt gewesen sein, seit man sich überhaupt mit solchen Grenzwerten beschäftigt hat. Dass sie auch *hinreicht*, wurde bis in die neueste Zeit als *selbstverständlich* angesehen, aber *niemals ausdrücklich bewiesen*. Das Verdienst, diese Notwendigkeit zuerst hervorgehoben zu haben, gebührt *Bolzano*⁸⁶⁾, der den entsprechenden Beweis für den besonderen Fall der Reihenkonvergenz⁸⁷⁾ wenigstens zu führen *versuchte*. Derselbe ist allerdings unzulänglich, wie auch ein von *Herm. Hankel* gegebener (auf den allgemeineren Fall *beliebiger* Zahlenmengen bezüglicher) Beweis⁸⁸⁾.

betrachtungen nicht immer streng einhalten (wie z. B. oben bezüglich des Citates über das bestimmte Integral oder bei den folgenden Bemerkungen über den Beweis des Grenzwertkriteriums).

84) Das uns heute völlig unentbehrlich gewordene Zeichen *lim* scheint mir zuerst von *Simon L'Huilier* (Exposition élément. des calculs supérieurs, Berlin 1786 — auch unter dem Titel: Principiorum calc. diff. et integr. expositio, Tübingen 1795) angewendet worden zu sein. Allgemein gebräuchlich ist es wohl erst seit *Cauchy* (Anal. algèbr. p. 13) geworden (d. h. also seit 1821; in dem grossen *Traité de calc. diff. et integr.* von *Lacroix*, 1810 — 1819, wird noch jeder einzelne Grenzübergang umständlich mit Worten bezeichnet. Die oben genannte, in den mir bekannten histor. Darstellungen bei weitem nicht nach Gebühr geschätzte Schrift *L'Huilier's* (von der Berl. Akademie als Lösung einer 1784 gestellten Preisfrage preisgekrönt) enthält die erste strenge Darstellung des Grenzbegriffs auf Grund der Euklidischen Verhältnislehre und der Exhaustionsmethode.

85) Dieser Satz mit seiner Übertragung auf *beliebige* (z. B. stetige) Zahlenmengen — von *Du Bois-Reymond* als das „allgemeine Convergenzprinzip“ bezeichnet (Allg. Funct.-Theorie, pp. 6. 260) — ist der eigentliche *Fundamentalsatz der gesamten Analysis* und sollte mit genügender Betonung seines fundamentalen Charakters an der Spitze jedes rationellen Lehrbuches der Analysis stehen.

86) „Rein analytischer Beweis des Lehrsatzes, etc.“ Prag 1817. Vgl. *Stolz*, Math. Ann. 18 (1881), p. 259.

87) Vgl. auch Nr. 21 dieses Artikels.

Da die Richtigkeit des fraglichen Satzes wesentlich und ausschliesslich auf der *wohldefinierten Existenz der Irrationalzahlen* beruht, so fallen die ersten strengen Beweise desselben naturgemäss mit dem Auftreten der *arithmetischen Irrationalzahltheorien* und der damit zusammenhängenden Revision und Verschärfung auch der älteren *geometrisierenden* Erklärungsweise (vgl. Nr. 7) zusammen. Bei *Cantor* erscheint der Satz als eine ganz unmittelbar aus der *Definition* der Irrationalzahlen resultierende *Folgerung*, wie von ihm selbst scharf hervorgehoben wird⁸⁹). Auch *Dedekind* hat im Anschluss an seine Irrationalzahltheorie einen vollkommenen Beweis desselben (für den allgemeineren Fall *beliebiger Zahlenmengen*) geliefert⁹⁰). Der letztere ist von *U. Dini* etwas einfacher gefasst⁹¹) und sodann von *Du Bois-Reymond* der von ihm vertretenen Anschauungsweise angepasst worden⁹²). Andere Modifikationen jenes Beweises haben *Stolz*, *J. Tannery*, *C. Jordan*⁹³) und *P. Mansion*⁹⁴) gegeben.

Ist die Zahlenfolge (a_n) *monoton*⁹⁵), d. h. niemals *ab-* oder niemals *zunehmend*, so genügt für deren *Konvergenz* die Bedingung, dass die a_n numerisch unter einer festen Zahl bleiben (Beispiel: die system. Brüche). Man kann diese *einfachste* Form von konvergenten Zahlenfolgen auch zum Ausgangspunkte für die Lehre von den Irrationalzahlen und Grenzwerten nehmen⁹⁶). Doch bedarf man dann, um die Subtraktion und Division definieren zu können, stets *zwei* solcher Folgen (einer niemals *ab-* und einer niemals *zunehmenden*)⁹⁷).

14. Das Unendlichgrosse und Unendlichkleine. Haben die Terme einer unbegrenzten Folge wohldefinierter Zahlen (a_n) die Eigenschaft, dass, wie gross auch eine positive Zahl G vorgeschrieben werde, von einem bestimmten Index ν ab durchweg: $a_n > G$ (bezw. $a_n < -G$),

89) Math. Ann. 21 (1883), p. 124.

90) A. a. O. p. 30.

91) Fondamenti per la teorica etc. p. 27.

92) Allg. Funct.-Theorie p. 260.

93) Vgl. meine Bemerkungen in den Münch. Sitzber. 27 (1897), pp. 357, 358. — *Stolz* hat auch die Existenz des Grenzwertes durch dessen Darstellung in system. Form erwiesen: Allg. Arithm. 1, p. 115 ff. (vgl. Nr. 9 dieses Artikels).

94) Mathesis 5 (1885), p. 270.

95) Dieser Ausdruck stammt von *C. Neumann*: „Über die nach Kreis-, Kugel- und Cylinder-Funct. fortschr. Entw.“, Leipzig 1881, p. 26.

96) Vgl. *Mansion*, Mathesis 5, p. 193.

97) *Bachmann* a. a. O. pp. 12. 13. Vgl. Nr. 4, Note 20. — Wählt man zur Definition der Irrat.-Zahlen noch speciellere Zahlenfolgen, etwa die system. Brüche, so tritt schon bei der Definition der Addition und Multiplikation eine Schwierigkeit ein.

so sagt man, der Grenzwert der a_v sei positiv (negativ) *unendlich*, in Zeichen:

$$\lim_{v=\infty} a_v = +\infty \quad (\text{bezw.} \quad \lim_{v=\infty} a_v = -\infty).$$

Die Zahlenfolge (a_v) heisst alsdann *eigentlich divergent*.

Dieser Satz hat nach heutiger Auffassung als *Definition des Unendlichen* zu gelten⁹⁸⁾, während ihn ältere Analysten als einen beweisbaren *Lehrsatz* anzusehen pflegten⁹⁹⁾; in Wahrheit musste aber jeder solche Beweis auf einen blossen *circulus vitiosus* hinauslaufen, solange keine anderweitige *mathematisch-greifbare Definition* des *Unendlichen* existierte¹⁰⁰⁾ (was erst seit neuester Zeit der Fall ist — s. etwas weiter unten).

Auf Grund der oben gegebenen Definition ist unter den Zahlen a_v , wie gross auch v angenommen werden mag, *keine unendlich grosse*, dagegen bedient man sich der *Ausdrucksweise*, die Zahlen a_v werden mit *unbegrenzt* wachsenden Werten von v *unendlich gross*. Das *Unendliche*, welches bei dieser Definitionsform lediglich als ein *Veränderlich-Endliches*, also als ein *Werdendes*, kein *Gewordenes* erscheint, wird als *potentiales*¹⁰¹⁾ oder *uneigentliches*¹⁰²⁾ *Unendlich* bezeichnet.

Aber auch *unabhängig* von jedem derartigen *Werdeprozess* lässt sich das *Unendliche* als ein *aktuales* oder *eigentliches Unendlich* streng arithmetisch definieren. B. Bolzano¹⁰³⁾ hat als eigentümliches Merkmal einer *unendlichen* Menge von Elementen hervorgehoben, dass die Elemente, welche lediglich einen gewissen *Teil* jener Menge bilden, den Elementen der *Gesamt-Menge* *eindeutig-umkehrbar* zugeordnet werden können (z. B. der *Gesamt-Menge* der Zahlen $0 < y < 12$ die *Teil-Menge* der Zahlen $0 \leq x \leq 5$ auf Grund der Festsetzung: $5y = 12x$). Die nämliche Eigenschaft hat G. Cantor dahin formuliert, dass bei einer *unendlichen* Menge und *nur* bei einer solchen ein *Teil* der Menge mit ihr selbst *gleiche Mächtigkeit* besitzen könne¹⁰⁴⁾. Unabhängig von den

98) Etwa seit *Cauchy*: *Analyse algèbre*. pp. 4. 27.

99) S. z. B. *Jac. Bernoulli*, *Positiones arithmeticae de seriebus infinitis* (1689), Prop. II (Opera, Genevae 1744, 1, p. 379).

100) Auch was z. B. *Du Bois-Reymond* in seiner Allg. Functionen-Theorie p. 69 ff. über die Unterscheidung des „Unendlichen“ vom „Unbegrenzten“ sagt, erscheint unhaltbar. Vgl. meine Bemerk. Münch. Sitzber. 1897, p. 322, Fussn. 1.

101) Das *Infinitum potentia* oder *syntagorematische Unendlich* der Philosophen, im Gegensatz zu dem sogleich zu erwähnenden *Infinitum actu* oder *kategorematischen* (aktualen) *Unendlich*.

102) Nach G. Cantor, *Math. Ann.* 21 (1883), p. 546.

103) *Paradoxien des Unendlichen*. Leipzig 1851, S. 20.

beiden genannten¹⁰⁵) hat *Dedekind* diese Eigenschaft geradezu zur *Definition* des *Unendlichen* erhoben, d. h. (mit Beibehaltung der eben benützten *Cantor'schen* Ausdrucksweise): Eine Menge heisst *unendlich*, wenn sie eine *Teil-Menge* von *gleicher Mächtigkeit* enthält; im entgegengesetzten Falle heisst sie *endlich*¹⁰⁶). *Dedekind* beweist sodann die *Existenz unendlicher Mengen*¹⁰⁷), leitet daraus den Begriff der *natürlichen Zahlenreihe* und schliesslich denjenigen der *Anzahl* einer *endlichen Menge* ab.

Umgekehrt hat *G. Cantor*, den *Anzahl-Begriff* für *endliche Mengen* in der üblichen Weise als etwas *a priori* gegebenes ansehend, diesen Begriff auf *unendliche Mengen* übertragen und ist hierdurch zur Aufstellung eines konsequent ausgebildeten *Systems von eigentlich-unendlichen* („überendlichen“ oder „transfiniten“) Zahlen geführt worden¹⁰⁸).

In der *Arithmetik* erscheint das *Unendliche* immer nur als *Uneigentlich-Unendliches*, also als *Veränderlich-Endliches*, dessen absoluter Betrag an keine obere Schranke gebunden ist. In der *Funktionenlehre*, zumal für complexe Veränderliche, hat es sich indessen als zweckmässig erwiesen, neben diesem *Uneigentlich-Unendlichen* auch ein *Eigentlich-Unendliches* in der Weise einzuführen, dass man allen möglichen *endlichen Werten*, deren eine Veränderliche fähig ist, den Wert ∞ wie einen *einzigen, bestimmten* (geometrisch durch einen bestimmten Punkt repräsentierten) hinzufügt¹⁰⁹).

105) Vgl. das Vorwort zur 2. Auflage der Schrift: Was sind und was sollen die Zahlen? Braunschweig 1895. (Erste Auflage 1887.)

106) A. a. O. Nr. 64. *D.* bezeichnet dabei zwei Mengen von „gleicher Mächtigkeit“ (also solche, deren Elemente sich eindeutig-umkehrbar einander zuordnen lassen) als „ähnlich“ (oder auch ausführlicher als solche, die ineinander ähnlich abgebildet werden können). — Eine andere, in gewisser Beziehung noch einfachere Definition des Unendlichen giebt *D.* in dem oben citierten Vorwort, p. XVII. — Vgl. auch *Franz Meyer*, Zur Lehre vom Unendlichen. Antr.-Rede, Tübingen 1889; *C. Cranz*, Wundt's Philos. Studien 21 (1895), p. 1; *E. Schroeder*, Nova acta Leop. 71 (1898), p. 303.

107) Ähnlich, wie schon *Bolzano* a. a. O. § 13.

108) Math. Ann. 21 (1883), p. 545 ff. Die betr. Abhandlung enthält auch eine mit zahlreichen Citaten versehene historisch-kritische Erörterung des Unendlichkeitsbegriffs. — Weiteres über *transfinite Zahlen* s. I A 5, Nr. 3 ff.

109) Dieses eigentliche *Unendlich* der Funktionentheorie lässt sich keineswegs allemal ohne weiteres durch das *uneigentliche Unendlich* ersetzen; mit anderen Worten: das Verhalten einer Funktion $f(x)$ für alle möglichen noch so grossen Werte von x braucht noch keineswegs dasjenige für den Wert $x = \infty$ zu bestimmen. Setzt man z. B.

Etwas anders verhält es sich mit dem sogenannten *Unendlichkleinen*. Ist $\lim a_n = 0$, so bedient man sich häufig der *Ausdrucksweise*, die Zahlen a_n werden mit *unbegrenzt* wachsenden Werten von n *unendlichklein*¹¹⁰⁾. Wo immer in der *Arithmetik*, *Funktionenlehre*, *Geometrie* das sog. *Unendlichkleine* auftritt, ist es immer nur ein *unendlichklein werdendes*, also nach der oben gebrauchten Terminologie *Uneigentlich-Unendlichkleines*¹¹¹⁾. Wenn es auch neuerdings gelungen ist, in sich konsequente Systeme *eigentlich-unendlichkleiner „Grössen“* aufzustellen¹¹²⁾, so handelt es sich hierbei doch lediglich um blosse *Zeichensysteme* mit *rein formal* definierten Gesetzen, welche von den für reelle Zahlen geltenden zum Teil verschieden sind. Solche fingierte *eigentlich-unendlichkleine Grössen* stehen zu den *reellen Zahlen* in keinerlei direkter Beziehung; sie finden in der *eigentlichen Arithmetik* und *Analysis* keinen Platz und können auch nicht, wie die reellen Zahlen, dazu dienen, *geometrische Grössenbeziehungen* widerspruchsfrei zu *beschreiben*. Insbesondere lässt sich aus der Möglichkeit derartiger arithmetischer Konstruktionen *keineswegs* die *Existenz unendlichkleiner geometrischer Grössen* (z. B. *Linienelemente*) folgern. *G. Cantor* hat vielmehr ausdrücklich gezeigt, dass aus der Annahme von Zahlen, die numerisch *kleiner* sind als *jede positive Zahl*, geradezu die *Nichtexistenz unendlichkleiner Strecken* erschlossen werden kann¹¹³⁾.

15. Oberer und unterer Limes. Aus einer *uneigentlich diver-*

so hat man für *jedes noch so grosse* endliche x ausnahmslos:

$$f(x) = 1,$$

dagegen:

$$f_n(\infty) = 0, \text{ also auch: } f(\infty) = 0.$$

Im übrigen ist allgemein das Verhalten einer Funktion $f(x)$ für jenen Wert oder Punkt $x = \infty$ definiert durch dasjenige von $f\left(\frac{1}{x}\right)$ für $x \rightarrow 0$. Vgl. II B 1. — Ein anderer Typus des Eigentlich-Unendlichen („die unendlich ferne Gerade“) hat sich in der projektiven *Geometrie* als zweckmässig erwiesen.

110) *Cauchy*, Anal. algebr. p. 4. 26.

111) Mit dem *eigentlich-unendlichen* $x = \infty$ der Funktionentheorie korrespondiert nicht etwa ein *eigentlich-unendlichkleiner* Wert x , sondern der Wert $x = 0$.

112) *O. Stolz* hat mit Benützung *Du Bois-Reymond'scher* Untersuchungen zwei verschiedene Systeme von *eigentlich-unendlichkleinen Grössen* konstruiert: Ber. d. naturw.-medic. Vereins, Innsbruck 1884, p. 1 ff. 37 ff. Allg. Arithm. 1, p. 205 ff. Vgl. I A 5, Nr. 17. — Über *P. Veronese's „Infiniti und Infinitesimi attuali“* vgl. I A 5, Fussn. 103. 107. — Eine ausführlich historisch-kritische Darstellung der Lehre von den unendlich-kleinen Grössen giebt *G. Viranti's* Schrift: Il concetto d'infinitesimo, Mantova 1894.

113) Z. f. Philos. 91, p. 112. Vgl. auch *O. Stolz*: Math. Ann. 31 (1888).

genten, d. h. weder konvergenten, noch eigentlich divergenten Zahlenfolge (a_v) lassen sich stets *zwei konvergente* oder *eigentlich divergente* Zahlenfolgen (a_{m_v}) , (a_{n_v}) von folgender Beschaffenheit herausheben: Setzt man

$$(1) \quad \lim_{v=\infty} a_{m_v} = A, \quad \lim_{v=\infty} a_{n_v} = a,$$

(wo $A > a$ und A, a entweder bestimmte Zahlen vorstellen oder auch $A = +\infty$, $a = -\infty$ sein kann), so lässt sich aus der Folge (a_v) keine Folge herausheben, welche einen grösseren Limes als A , oder einen kleineren Limes als a besitzt. A heisst hiernach der *grösste* oder *obere*, a der *kleinste* oder *untere Limes* der a_v , in Zeichen¹¹⁴⁾:

$$(2) \quad \limsup_{v=\infty} a_v = A, \quad \liminf_{v=\infty} a_v = a,$$

oder kürzer¹¹⁵⁾:

$$(3) \quad \overline{\lim}_{v=\infty} a_v = A, \quad \underline{\lim}_{v=\infty} a_v = a.$$

Vermöge dieser Verallgemeinerung des Limesbegriffs erscheinen die *konvergenten* und *eigentlich divergenten* Zahlenfolgen als derjenige Grenzfall, bei welchem *oberer und unterer Limes zusammenfallen*, sodass also:

$$(4) \quad \overline{\lim}_{v=\infty} a_v = \lim_{v=\infty} a_v = \underline{\lim}_{v=\infty} a_v.$$

Der Begriff des *oberen und unteren Limes* findet sich schon bei *Cauchy*¹¹⁶⁾, der speziell in der Reihenlehre eine äusserst wichtige Anwendung davon gemacht hat¹¹⁷⁾. *Du Bois-Reymond* hat für den *oberen und unteren Limes* die Bezeichnung *obere und untere Unbestimmtheitsgrenze* eingeführt¹¹⁸⁾ und wird deshalb vielfach fälschlich für den *Erfinder* des damit bezeichneten *Begriffs* gehalten. Immerhin kann man sagen, dass er als der erste die grosse und allgemeine Bedeutung jenes Begriffs für die Reihen- und Funktionenlehre ausdrücklich hervorgehoben und zu dessen konsequenter Anwendung¹¹⁹⁾ Veranlassung gegeben hat.

114) Nach *Pasch*, Math. Ann. 30 (1887), p. 134.

115) Nach einer neuerdings von mir eingeführten Bezeichnung: Münch. Sitzber. 28 (1898), p. 62. Die gelegentliche Anwendung der Bezeichnung $\overline{\lim}_{v=\infty} a_v$

soll bedeuten, dass in dem betreffenden Zusammenhange sowohl der *obere* als der *untere Limes* genommen werden darf.

116) Anal. algébr. p. 132, 151 etc. — *C.* bezeichnet den oberen Limes als „la plus grande des limites“. — „La plus petite des limites“ bei *N. H. Abel*: Oeuvres 2, p. 198.

117) Vgl. Nr. 23.

118) Antritts-Progr. d. Univ. Freiburg (1871), p. 3. Münch. Abh. 12, I. Abth. (1876), p. 125. Allg. Funct.-Th. p. 266.

119) Nach *du Bois-Reymond* (Münch. Sitzber. 28 (1898), p. 62).

16. Obere und untere Grenze. Mit dem Begriff des *oberen* (*unteren*) *Limes* zwar verwandt, dennoch scharf davon zu unterscheiden, ist der zuerst von *Bolzano*¹²⁰⁾ bemerkte, namentlich aber von *Weierstrass* (in seinen Vorlesungen)¹²¹⁾ betonte Begriff der *oberen* (*unteren*) *Grenze*¹²²⁾: Jede Zahlenfolge (a_v) mit endlich bleibenden (d. h. zwischen zwei bestimmten Zahlen enthaltenen) Termen besitzt eine bestimmte *obere* und *untere Grenze* G, g , d. h. man hat für jedes v : $g \leq a_v \leq G$ und für mindestens je einen Wert $v = m, v = n$: $G - \varepsilon < a_m \leq G, g \leq a_n < g + \varepsilon$ bei beliebig klein vorgeschriebenem positivem ε . Gibt es einen Term $a_m = G$ (eventuell auch mehrere oder sogar unendlich viele), so heisst die *obere Grenze* der a_v zugleich deren *Maximum*¹²³⁾. Gibt es *keinen* solchen, so müssen unendlich viele Terme a_{m_v} vorhanden sein, für welche: $G - \varepsilon < a_{m_v} < G$, d. h. in diesem Falle ist die *obere Grenze* G gleichzeitig der *obere Limes* der a_v . Dies findet offenbar ebenfalls statt, wenn für *unendlich viele* Werte von v die Beziehung $a_v = G$ besteht.

Das analoge gilt bezüglich der *unteren Grenze* g .

Bleiben die a_v *nicht* unterhalb einer bestimmten *positiven* bzw. oberhalb einer bestimmten *negativen* Zahl, so wird $G = +\infty$, bzw. $g = -\infty$. Auch in diesem Falle erscheint die *obere* bzw. *untere Grenze* zugleich als *oberer* bzw. *unterer Limes*¹²⁴⁾.

120) Beweis des Lehrs. etc. p. 41. Vgl. *Stolz*, Math. Ann. 18 (1881), p. 257.

121) *Pincherle* a. a. O. p. 242 ff.

122) *Pasch* a. a. O. bezeichnet das, was hier (nach dem Vorgange von *Weierstrass*) *obere* (*untere*) *Grenze* genannt wird, als *obere* (*untere*) *Schranke*, und verwendet den Ausdruck *obere* (*untere*) *Grenze* für den *oberen* (*unteren*) *Limes*. — Französische (und italienische) Autoren pflegen den Ausdruck *limite supérieure* (*limite supérieure*) etc. bald in dem einen, bald in dem andern Sinne zu gebrauchen, was leicht zu Unklarheiten Veranlassung geben kann.

123) *Darboux* (Ann. de l'école norm. (2) 4, p. 61) nennt die *obere* (*untere*) *Grenze*: „la limite maximum (minimum)“ — eine Bezeichnung, die nicht mit *Maximum* (*Minimum*) verwechselt werden darf. — Ich pflege im Falle $a_m = G$ die *obere Grenze* noch prägnanter als das *reale Maximum* der a_v zu bezeichnen, und nenne sie deren *ideales Maximum*, falls kein Term die *obere Grenze* G erreicht (eine Annahme, die auch den Fall $G = \infty$ mit umfasst). Alsdann kann man sagen: Der *obere Limes* fällt dann und nur dann mit der *oberen Grenze* zusammen, wenn dieselbe ein *ideales* oder *unendlich oft vorkommendes reales Maximum* ist. — Analog für die *untere Grenze*.

124) *G. Peano* hat darauf aufmerksam gemacht, dass man in gewissen Fällen (z. B. Def. des best. Integrals, der Rektifikation etc.) mit dem Begriffe der *oberen* (*unteren*) *Grenze* leichter und präziser operiert, als mit dem des *Limes*: Ann. di Mat. (2), 23 (1895), p. 153.

17. Das Rechnen mit Grenzwerten. Die Zahl $e = \lim \left(1 + \frac{1}{v}\right)^v$. Sind (a_v) , (b_v) konvergente Zahlenfolgen, so liefern die unmittelbar an die Definition der Irrationalzahlen anzuknüpfenden elementaren Rechnungsregeln die Relationen:

$$(5) \quad \left\{ \begin{array}{l} \lim a_v \pm \lim b_v = \lim (a_v \pm b_v), \quad \lim a_v \cdot \lim b_v = \lim (a_v b_v), \\ \frac{\lim a_v}{\lim b_v} = \lim \left(\frac{a_v}{b_v}\right)^{125} \end{array} \right.$$

(wobei in der letzten Gleichung der Fall $\lim b_v = 0$ auszuschliessen ist), und allgemein:

$$(6) \quad f(\lim a_v, \lim b_v, \lim c_v, \dots) = \lim f(a_v, b_v, c_v, \dots),$$

wenn f irgend eine Kombination der 4 Species (mit Ausschluss der Division durch 0) bedeutet.

Enthält das Rechnungssymbol f noch andere Forderungen, z. B. Wurzelausziehungen, so gilt Gl. (6) als *Definitions*-Gleichung, sofern die rechte Seite *konvergiert*. Mit Hülfe dieses Prinzips lässt sich insbesondere die Lehre von den gebrochenen und irrationalen Potenzen und deren Umkehrungen, den Logarithmen, konsequent und streng begründen¹²⁶).

Die ausgezeichneten arithmetischen Eigenschaften, welche die *natürlichen* Logarithmen (d. h. die mit der Basis e) von allen anderen voraus haben, beruhen auf den Beziehungen:

$$(7) \quad \lim \left(1 + \frac{1}{v}\right)^v = e, \quad \lim \left(1 + \frac{a}{v}\right)^v = e^a$$

(a eine beliebige reelle Zahl). Während die letzteren bei *Euler*¹²⁷) nur in dem Zusammenhange erscheinen, dass die Gleichheit der links stehenden Grenzwerte mit den zur *Definition* von e , e^a dienenden *Reihen* (in einer nach heutigen Begriffen freilich unzulänglichen Weise) abgeleitet wird, so hat *Cauchy*¹²⁸) die *Existenz* jener Grenzwerte direkt bewiesen und darauf die *Definition* der Exponentialgrößen und natürlichen Logarithmen gegründet — eine Methode, die seitdem in die meisten Lehrbücher der Analysis übergegangen ist¹²⁹).

125) Ich schreibe von jetzt ab, soweit ein Missverständnis ausgeschlossen erscheint, immer nur \lim statt $\lim_{v \rightarrow \infty}$.

126) Vgl. *Stolz*, Allg. Arithm. p. 125—148.

127) *Introductio in anal. inf.* 1 § 115—122.

128) *Résumé des leçons etc.* (1823), p. 2.

129) Dabei wird gewöhnlich die Definition der Potenz mit beliebigen

18. Sogenannte unbestimmte Ausdrücke. Werden die in Gl. (5), (6) vorkommenden $\lim a_v$, $\lim b_v$, ... $= \infty$ oder 0, so entstehen auf den *linken* Seiten jener Gleichungen zum Teil sogenannte *unbestimmte Ausdrücke*¹³⁰⁾ (wie: $\infty - \infty$, $0 \cdot \infty$, $\frac{\infty}{\infty}$, $\frac{0}{0}$, 0^0 , ∞^0 etc.), als deren „wahre Werte“ man die *rechts* stehenden *Grenzwerte* (sofern dieselben einen bestimmten Sinn besitzen) nicht gerade sehr passend zu bezeichnen pflegt. Obschon die Methoden zur Bestimmung derartiger Grenzwerte ihre volle Allgemeinheit erst durch die Einführung einer *stetigen* Veränderlichen an Stelle der veränderlichen *ganzen* Zahl v gewinnen und in dieser Form der Differentialrechnung angehören¹³¹⁾, so beruhen sie doch schliesslich (wie die ganze Lehre von den Funktionen *stetiger* Veränderlicher) auf gewissen einfachen Sätzen über Grenzwerte gewöhnlicher Zahlenfolgen. Hierhin gehören die folgenden von *Cauchy* herrührenden Beziehungen¹³²⁾.

Man hat

$$(8) \quad \lim \frac{a_v}{v} = \lim (a_{v+1} - a_v) \quad (\text{Beisp. } \lim \frac{1}{v} = 0, \quad \lim \frac{v}{v} = \infty)$$

und für $a_v > 0$:

$$(9) \quad \lim a_v^{\frac{1}{v}} = \lim \frac{a_{v+1}}{a_v} \quad (\text{Beisp. } \lim \sqrt[v]{v} = 1, \quad \lim \sqrt[v]{v!} = \infty),$$

vorausgesetzt, dass die *rechts* stehenden Grenzwerte (im weiteren Sinne) *existieren*¹³³⁾ (aber nicht umgekehrt).

Den ersten dieser Sätze hat *Stolz* folgendermassen verallgemeinert¹³⁴⁾:

Ist (m_v) *monoton* und: $\lim m_v = \pm \infty$ oder: $\lim m_v = 0$, so wird:

$$(10) \quad \lim \frac{a_v}{m_v} = \lim \frac{a_{v+1} - a_v}{m_{v+1} - m_v},$$

falls der *rechts* stehende Grenzwert (im weiteren Sinne) existiert.

kann aber auch die Existenz des Grenzwertes $\lim \left(1 + \frac{a}{v}\right)^v$ zur *Definition* der Potenz mit bel. reellen Exponenten benutzen: vgl. *Th. Wulf*, Wiener Monatsh. 8, p. 43 ff. — Diese Methode lässt sich übrigens auch auf complexe Werte von a übertragen; vgl. *J. A. Serret*, Calcul diff. 1 (oder *Serret - A. Harnack* 1, Art. 366.

130) Bei *Cauchy*: Valeurs singulières (Anal. algèbr. p. 15).

131) Vgl. II A 1.

132) Anal. algèbr. p. 59. (Die betr. Sätze sind daselbst zunächst in der allgemeineren Form, wo $f(x)$ an die Stelle von a_v tritt, bewiesen und durch Spezialisierung $x = v$ abgeleitet.)

133) D. h. endlich oder mit best. Vorzeichen unendlich sind.

19. Graduierung des Unendlich- und Nullwerdens. Auf der Untersuchung von Quotienten der Form $\frac{\infty}{\infty}$ (d. h. von $\lim \frac{a_v}{b_v}$, wo $\lim a_v = \infty$, $\lim b_v = \infty$) beruht die *Graduierung* des Unendlichwerdens von Zahlenfolgen (bezw. von Funktionen). Ist $\lim a_v = +\infty$, $\lim b_v = +\infty$, so sind, falls $\lim \frac{a_v}{b_v}$ überhaupt existiert¹³⁵), folgende drei Fälle zu unterscheiden:

$$(11) \quad \lim \frac{a_v}{b_v} = 0, \quad \lim \frac{a_v}{b_v} = g > 0, \quad \lim \frac{a_v}{b_v} = \infty,$$

für welche *Du Bois-Reymond* die Bezeichnungen eingeführt hat¹³⁶):

$$(12) \quad a_v < b_v, \quad a_v \sim b_v, \quad a_v > b_v,$$

in Worten:

a_v wird von niederer Ordnung (schwächer, langsamer) ∞ , als b_v ,
 „ „ „ derselben „ (ebenso) „ „ „
 „ „ „ höherer „ (stärker, schneller) „ „ „
 oder kürzer:

$$\begin{array}{lll} a_v \text{ ist infinitär kleiner, als } b_v \\ \text{„ „ „ gleich „} \\ \text{„ „ „ grösser, als „} \end{array}$$

Ich pflege die Bezeichnung $a_v \sim b_v$ und den ihr entsprechenden Ausdruck auch anzuwenden, wenn nur feststeht, dass $\lim \frac{a_v}{b_v}$ und $\overline{\lim} \frac{a_v}{b_v}$ beide endlich und von Null verschieden sind (also:

$$0 < g \leq \lim \frac{a_v}{b_v} \leq G < \infty),$$

und habe den obigen Bezeichnungen noch die folgende hinzugefügt¹³⁷):

$$(13) \quad a_v \sim g \cdot b_v, \quad \text{falls: } \lim \frac{a_v}{b_v} = g.$$

Ist (M_v) monoton zunehmend, $\lim M_v = \infty$,¹³⁸) so hat man:

$$(14) \quad \dots < (\lg_2 M_v)^{p''} < (\lg M_v)^{p'} < M_v^p < (e^{M_v})^{p_1} < (e^{e^{M_v}})^{p_2} < \dots,$$

¹³⁵) Dies braucht nicht einmal der Fall zu sein, wenn a_v , b_v beide monoton sind, s. z. B. *Stolz*, Math. Ann. 14, p. 232 und vgl. Nr. 29. 30 dieses Artikels.

¹³⁶) *Ann. di Mat. Ser. II* 4 (1870), p. 339. Die Ausbildung und Verwertung des in (11) (12) definierten Algorithmus bildet den Inhalt des *Du Bois-Reymond'schen Infinitärkalküls*.

¹³⁷) *Math. Ann.* 35 (1890), p. 302.

¹³⁸) Im Folgenden soll das Zeichen (M) ein für allemal eine Zahlenfolge

wenn $p^{(x)}$, p , p_x ganz beliebige (z. B. auch *wachsende*) positive Zahlen bedeuten und $\lg_x M$ den x -fach iterierten Logarithmus¹³⁹⁾ vorstellt. Man kann also, von einem beliebig gewählten „Unendlich“ $\lim M$, ausgehend, eine nach beiden Seiten unbegrenzte Skala von immer *schwächeren*, bzw. immer *stärkeren* „Unendlich“, sog. *Ordnungstypen* des Unendlichen aufstellen. Diese Skala lässt sich auf unendlich viele Arten beliebig *verdichten*¹⁴⁰⁾. Man ist auch bei ihrer Bildung nicht auf die Logarithmen und Exponentialfunktionen angewiesen; doch sind sie die *analytisch-einfachsten* Funktionen dieser Art. Man kann aber auch Zahlenfolgen bzw. Funktionen konstruieren, die schwächer (stärker) unendlich werden nicht nur als jeder bestimmte *einzelne*, sondern als *alle möglichen* iterierten Logarithmen¹⁴¹⁾ (Exponentialfunktionen). Das analoge gilt auch für *jede beliebige* Skala solcher Ordnungstypen¹⁴²⁾.

Im Anschluss an Nr. 14 sei noch bemerkt, dass es sich bei diesen „*verschiedenen Typen*“ des Unendlich keineswegs um *eigentliche* Unendlich in dem dort näher bezeichneten Sinne handelt. Die sog. infinitären Relationen von der Form (12) sind lediglich Zusammenfassungen einer unbegrenzten Anzahl von Beziehungen zwischen *endlichen* Zahlen, die an keine obere Grenze gebunden sind¹⁴³⁾.

Die analogen Betrachtungen lassen sich bezüglich des Null- oder Unendlichkleinwerdens anstellen. Nur hat naturgemäss im Falle $\lim a_n = 0$, $\lim b_n = 0$ die Beziehung $a_n < b_n$ die Bedeutung: a_n wird von *höherer* Ordnung (stärker, schneller) unendlichklein, als b_n u. s. f.¹⁴⁴⁾.

20. Grenzwerte zweifach unendlicher Zahlenfolgen. Die *Grenzwerte zweifach unendlicher* Zahlenfolgen sind meines Wissens in der Litteratur bisher nicht ausdrücklich behandelt worden; man hat nur *spezielle* Formen solcher Grenzwerte (Doppelreihen) und Grenzwerte von *Funktionen zweier Variablen* untersucht, von denen *mindestens eine*

139) Auf die Betrachtung solcher iterierten Logarithmen (und, als naturgemässe Ergänzung, auf diejenige iterierter Exponentialgrössen) ist man durch Untersuchungen über Reihenkonvergenz geführt worden; vgl. Nr. 26 dieses Artikels. — Abel war, soweit ich feststellen konnte, der erste, der von den iterierten Logarithmen in diesem Sinne Gebrauch machte: *Oeuvres compl.* Ed. Sylow-Lie 1, p. 400; 2, p. 200. — Skalen von ähnlicher Form wie (14), finden sich zuerst bei A. de Morgan, *Diff. and integr. calculus* (London 1839) p. 323.

140) Du Bois-Reymond a. a. O. p. 341.

141) Du Bois-Reymond, J. f. Math. 76 (1873), p. 88.

142) Du Bois-Reymond, Math. Ann. 8, p. 365, Fussnote. Pincherle, Mem. Acad. Bologn. (4), 5 (1884), p. 739. J. Hadamard, Acta math. 18 (1894), p. 331.

(bei den unendlichen Reihen $\sum f_\nu(x)$) als *stetig* veränderlich erscheint. Da das charakteristische der hierbei in Frage kommenden Möglichkeiten am einfachsten an Zahlenfolgen der Form $a_{\mu\nu}$ ($\mu = 0, 1, 2, \dots$; $\nu = 0, 1, 2, \dots$) hervortritt¹⁴⁵⁾, so habe ich neuerdings die wichtigsten Sätze über solche Grenzwerte kurz zusammengestellt¹⁴⁶⁾. Als *Kriterium* für die Existenz eines endlichen bzw. positiv unendlichen $\lim_{\mu, \nu = \infty} a_{\mu\nu}$

erscheint dabei eine Bedingung von der Form: $|a_{\mu+\varrho, \nu+\sigma} - a_{\mu\nu}| \leq \varepsilon$ bzw. $a_{\mu\nu} > G$ für $\mu \geq m, \nu \geq n$. Hierdurch wird also die Existenz von $\lim_{\nu = \infty} a_{\mu\nu}$ für irgend ein bestimmtes μ und $\lim_{\mu = \infty} a_{\mu\nu}$ für irgend ein bestimmtes ν in keiner Weise präjudiziert. Dagegen existieren offenbar unter allen Umständen: $\lim_{\nu = \infty} a_{\mu\nu}, \overline{\lim}_{\nu = \infty} a_{\mu\nu}$ ($\mu = 0, 1, 2, \dots$), $\lim_{\mu = \infty} a_{\mu\nu}, \overline{\lim}_{\mu = \infty} a_{\mu\nu}$ ($\nu = 0, 1, 2, \dots$), und es gilt der Hauptsatz:

$$(15) \quad \lim_{\mu, \nu = \infty} a_{\mu\nu} = \lim_{\mu = \infty} (\overline{\lim}_{\nu = \infty} a_{\mu\nu}) = \lim_{\nu = \infty} (\overline{\lim}_{\mu = \infty} a_{\mu\nu}),$$

falls der *erste* dieser Grenzwerte (im weiteren Sinne) existiert.

Zweiter Teil. Unendliche Reihen, Produkte, Kettenbrüche und Determinanten.

III. Unendliche Reihen.

21. Konvergenz und Divergenz. Den einfachsten Typus von gesetzmässig definierten Zahlenfolgen bilden die *unendlichen Reihen* (s_ν) , bei welchen jeder Term s_ν aus dem vorangehenden durch eine einfache *Addition* erzeugt wird, so dass also:

$$s_\nu = s_{\nu-1} + a_\nu = a_0 + a_1 + \dots + a_\nu.$$

Man sagt alsdann, die *unendliche Reihe* $\sum_0^\infty a_\nu$ sei *konvergent*, eigentlich oder uneigentlich *divergent*, je nachdem die Zahlenfolge (s_ν) *konvergiert* bzw. eigentlich oder uneigentlich *divergiert*. Ist $\lim s_\nu = s$ (s eine bestimmte Zahl incl. 0), so heisst s die *Summe* der Reihe¹⁴⁸⁾.

145) Dies gilt z. B. auch bezüglich des fundamentalen Begriffs der gleichmässigen Konvergenz. Vgl. II A 1.

146) Münch. Ber. 27 (1897), p. 103 ff.

147) A. a. O. p. 105.

148) Einige Autoren bezeichnen s zunächst nur als den Grenzwert der Reihe und benützen den Ausdruck *Summe* nur dann, wenn $\lim s_\nu$ *kommutativ* ist, also die Reihe *unbedingt* (vgl. Nr. 31) konvergiert. — Über die Bedeutung des Zeichens $\sum_0^\infty a_\nu$ vgl. Nr. 59, Fussn. 448.

Man bedient sich auch vielfach des Ausdrucks, die *Summe* der Reihe sei *unendlich gross* oder *unbestimmt* (sie *oscilliere*), wenn (s_n) *eigentlich* oder *uneigentlich* divergiert. Als *notwendige und hinreichende* Bedingung für die *Konvergenz* der Reihe ergibt sich nach Nr. 13:

Es muss $|s_{n+q} - s_n| \equiv |a_{n+1} + a_{n+2} + \dots + a_{n+q}|$ lediglich durch Wahl von n für jedes q beliebig klein werden.

Obschon die Einführung unendlicher Reihen bis ins 17. Jahrhundert zurückreicht¹⁴⁹⁾ und ihre Behandlung in der mathematischen Litteratur des 18. einen überaus breiten Raum einnimmt, so wird man darin vergeblich nach einem derartigen *Kennzeichen* der Konvergenz suchen¹⁵⁰⁾. Wenn man *überhaupt* nach der *Konvergenz* einer durch irgendwelche formale Operationen gewonnenen Reihenentwicklung fragte (was schon an und für sich zu den Ausnahmen gehörte), so hielt man die Feststellung, dass $\lim a_n = 0$ sei, schon für ausreichend, obschon doch bereits *Jac. Bernoulli* die *Divergenz* der harmonischen Reihe $\sum \frac{1}{n}$ nachgewiesen hatte¹⁵¹⁾. Selbst *J. L. Lagrange* steht in seiner Abhandlung über die Auflösung der litteralen Gleichungen durch Reihen noch vollständig auf diesem Standpunkte¹⁵²⁾.

149) Über die ältere Entwicklungsgeschichte der Lehre von den unendl. Reihen vgl. *Reiff* a. a. O.

150) *Reiff* (p. 119) scheint mir zu irren, wenn er eine Stelle bei *Euler* (Comm. Petrop. 7, 1734, p. 150) dahin auffasst, dass letzterer die *Konvergenzbedingung* in der (*Cauchy'schen*) Form: $\lim_{n=\infty} (s_{n+q} - s_n) = 0$ eigentlich schon gekannt habe. Die betreffende Stelle bei *Euler* besagt nämlich nur, dass eine Reihe *divergiert*, wenn: $\lim_{n=\infty} |s_{kn} - s_n| > 0$.

151) Pos. arithm. de seriebus 1689. Prop. XVI (Opera omnia 1, p. 392). *B.* giebt daselbst *zwei* Beweise, und bezeichnet seinen Bruder *Johann* als Urheber des *ersten* (auf dem sog. *Bernoulli'schen Paradoxon* $\sum_2^\infty \frac{1}{n} = \sum_1^\infty \frac{1}{n}$ beruhenden). Der *zweite* (mit Hilfe der Ungleichung

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a+1} + \dots + \frac{1}{a^2} < \frac{1}{a} + \frac{a^2 - a}{a^2} = 1)$$

ist der im Prinzip heute noch übliche.

152) Berl. Mém. 24 (1770). Oeuvres 3, p. 61. „... pour qu'une série puisse être regardée comme représentant réellement la valeur d'une quantité cherchée, il faut qu'elle soit convergente a son extrémité, c'est à dire que ses derniers termes soient infiniment petits, de sorte que l'erreur puisse devenir moindre qu'aucune quantité donnée“. Die nun folgende Konvergenzuntersuchung beschränkt sich auf den Nachweis, dass die einzelnen Reihenglieder schliesslich gegen Null konvergieren. — Hiernach kann es kaum verwunderlich erscheinen, dass sich z. B. in dem 1803 gedruckten 1. Bande des *Klein'schen* W. B. ...

Und die Einführung des *Restgliedes* der *Taylor'schen* Reihe geschieht bei *Lagrange* keineswegs in der Absicht, deren *Konvergenz* zu beweisen (diese wird überhaupt als etwas selbstverständliches mit keinem Worte berührt), sondern lediglich, um die *Fehlergrenze* bei endlichem Abbrechen der Reihe abschätzen zu können¹⁵³).

Die erste im wesentlichen strenge Formulierung der notwendigen und hinreichenden Bedingung für die Konvergenz einer Reihe wird gewöhnlich *Cauchy*¹⁵⁴) zugeschrieben. *Herm. Hankel*¹⁵⁵) und *O. Stolz*¹⁵⁶) haben indessen hervorgehoben, dass sich dieselbe schon einige Jahre vor *Cauchy* bei *Bolzano*¹⁵⁷) findet. Des letzteren Fassung, die (abgesehen von der Bezeichnung) genau mit der oben gegebenen übereinstimmt, erscheint sogar präziser als die von *Cauchy* gegebene, welche die Möglichkeit eines Missverständnisses nicht ausschliesst¹⁵⁸). Da *Bolzano's* Schriften bis in die neueste Zeit wenig Beachtung fanden, so muss immerhin gesagt werden, dass *Cauchy* als der eigentliche Begründer einer exakten allgemeinen Reihenlehre anzusehen ist¹⁵⁹).

22. Die Konvergenzkriterien von Gauss und Cauchy. Das oben angegebene *wahre Kriterium* für die Konvergenz und Divergenz einer Reihe ist nur in wenigen Fällen (z. B. bei der geometrischen Progression, bei Reihen von der Form $\sum (a_n - a_{n+1})$, bei der harmonischen Reihe) für die Feststellung der Konvergenz oder Divergenz verwendbar. Dieser Umstand führte zur Aufstellung von bequemer zu

folgende Definition vorfindet: „Eine Reihe ist konvergierend, wenn ihre Glieder in ihrer Folge nacheinander immerfort kleiner werden. Die Summe der Glieder nähert sich alsdann immer mehr dem Werte der Grösse, welche die Summe der ins Unendliche fortgesetzten Reihe ist.“

153) *Théorie des fonctions* (1797). *Oeuvres* 9, p. 85.

154) *Anal. algèbr.* (also 1821), p. 125.

155) *Ersch u. Gruber*, Art. Grenze, p. 209.

156) *Math. Ann.* 18 (1881), p. 259.

157) *Beweis des Lehrsatzes etc.* 1817.

158) Dies gilt in noch höherem Masse von einer späteren, in den *Anc. exerc.* 2 (1827), p. 221 auftretenden Fassung: $\lim_{n=\infty} (s_{n+\varrho} - s_n) = 0$ — die in der

That auch missverstanden und infolgedessen angefochten worden ist. Vgl. meine Note in den *Münch. Sitzber.* 27 (1897), p. 327. — *N. H. Abel*, der sich in seiner Abh. über die binomische Reihe (*J. f. Math.* 1, 1826, p. 313) fast wörtlich ebenso ausdrückt, giebt in einer aus dem J. 1827 stammenden, aber erst in seinem Nachlasse vorgefundenen Note (*Oeuvres* 2, p. 197) eine mit der unsrigen übereinstimmende, einwandfreie Formulierung.

159) *K. F. Gauss* geht in seiner Untersuchung über die hypergeometrische Reihe (1812), welche freilich das *erste Beispiel* exakter Konvergenzuntersuchung

handhabenden *Konvergenz-* und *Divergenzkriterien*, d. h. Bedingungen, welche sich für die Konvergenz bzw. Divergenz zwar *nicht* als *notwendig*, wohl aber als *hinreichend* erweisen. Die ersten Kriterien dieser Art rühren von *Gauss* her¹⁶⁰⁾ und beziehen sich auf Reihen mit lauter positiven Gliedern a_v , für welche:

$$\frac{a_{v+1}}{a_v} = \frac{v^m + A v^{m-1} + B v^{m-2} + \dots}{v^m + a v^{m-1} + b v^{m-2} + \dots}.$$

Die Reihe *divergiert*, wenn $A - a \geq -1$, sie *konvergiert*, wenn $A - a < -1$.¹⁶¹⁾ Dabei wird die *Divergenz* im Falle $A - a > 0$ bzw. $A - a = 0$ unmittelbar daraus erschlossen, dass die Glieder der Reihe ins Unendliche wachsen bzw. einer endlichen, von Null verschiedenen Grenze zustreben. Dagegen ergibt sich im Falle $A - a < 0$ die *Divergenz* bzw. *Konvergenz* mit Hülfe des für alle weiteren Konvergenzuntersuchungen als *fundamental* anzusehenden Prinzipes der *Reihenvergleichung* (d. h. der gliedweisen Vergleichung der zu untersuchenden Reihe mit einer anderweitig, z. B. durch direkte Summation, bereits als *divergent* oder *konvergent* erkannten Reihe).

23. Fortsetzung. Nachdem *Cauchy* festgestellt hatte, dass die *Konvergenz* einer Reihe mit *positiven* und *negativen* Gliedern gesichert ist, falls die Reihe der *absoluten Beträge* konvergiert¹⁶²⁾, handelte es sich vor allem um die Ausbildung der Konvergenzkriterien für Reihen mit lauter *positiven Gliedern*. Durch Vergleichung mit der geometrischen Progression gewann er zunächst die beiden *Fundamentalkriterien erster und zweiter Art*¹⁶³⁾, nämlich:

- (I) $\sum a_v$ *divergiert*, wenn $\overline{\lim} \sqrt[v]{a_v} > 1$; *konvergiert*, wenn $\lim \sqrt[v]{a_v} < 1$,
 (II) „ „ „ $\lim \frac{a_{v+1}}{a_v} > 1$; „ „ „ $\lim \frac{a_{v+1}}{a_v} < 1$.

Hervorzuheben ist die scharfe Unterscheidung in der Fassung dieser beiden Kriterien; bei (I) genügt schon die Beschaffenheit des *oberen Limes* von $\sqrt[v]{a_v}$, um — mit Ausschluss des *einzigen* Falles $\lim \sqrt[v]{a_v} = 1$

160) S. die eben citierte Abhandlung: Opera 3, p. 139.

161) Eine Ausdehnung dieser Kriterien auf den Fall *complexer* a_v , hat *Weierstrass* angegeben: J. f. Math. 51 (1856), p. 22 ff.

162) Anal. algèbr. p. 142. — Die Fassung des Beweises ist freilich unzulänglich. *Strenger*: Résumé. analyt. p. 39.

163) A. a. O. p. 133, 134. — Wir bezeichnen ein Kriterium nach dem Vorgehens von *Du Bois-Reymond* (J. f. Math. 76, p. 61) als ein solches *erster* bzw.

zweiter Art, je nachdem es ausschließlich von $\lim \sqrt[v]{a_v}$ oder von $\lim \frac{a_{v+1}}{a_v}$ abhängt.

— die Divergenz oder Konvergenz zu entscheiden; bei (II) wird ausdrücklich nur der Fall betrachtet, dass ein bestimmter $\lim \frac{a_{v+1}}{a_v}$ existiert, d. h. es bleiben ausser dem Falle $\lim \frac{a_{v+1}}{a_v} = 1$ auch noch alle diejenigen unerledigt, wo kein bestimmter Limes vorhanden ist¹⁶⁴). Diese Überlegenheit des Kriteriums (I) über (II) ist von Cauchy noch speziell hervorgehoben worden¹⁶⁵), und er hat ferner gezeigt, wie dasselbe dazu dienen kann, das Konvergenzintervall¹⁶⁶) (den Konvergenzradius¹⁶⁷) einer Potenzreihe $\sum a_v x^v$ in jedem Falle genau zu fixieren¹⁶⁸). Zur eventuellen Erledigung desjenigen Falles, welchen die Anwendung des Kriteriums (I) unentschieden lässt, beweist Cauchy einen Hilfsatz über die gleichzeitige Divergenz und Konvergenz der Reihen $\sum a_v$ und $\sum 2^v \cdot a_{2^v-1}$ (falls $a_{v+1} \leq a_v$), erschliesst aus ihm die Divergenz der Reihe $\sum \frac{1}{v^{1+\varrho}}$ für $\varrho \leq 0$, die Konvergenz für $\varrho > 0$ und leitet daraus ein verschärftes Kriterium erster Art ab:

164) Etwas vollständiger kann man (II) folgendermassen fassen: $\sum a_v$ divergiert, wenn $\lim \frac{a_{v+1}}{a_v} > 1$, konvergiert, wenn $\lim \frac{a_{v+1}}{a_v} < 1$. Unentschieden bleibt die Frage, wenn gleichzeitig:

$$\lim \frac{a_{v+1}}{a_v} \leq 1, \quad \overline{\lim} \frac{a_{v+1}}{a_v} \geq 1.$$

165) A. a. O. p. 135 „le premier de ces théorèmes etc.“

166) A. a. O. p. 151. — Résumés analyt. (1833), p. 46.

167) A. a. O. p. 286. — Rés. analyt. p. 113. — Exerc. d'Anal. 3 (1844), p. 390.

168) Es ist eigentümlich, dass dieses für die Funktionentheorie äusserst wichtige Resultat (auf das auch Cauchy selbst sichtlich grossen Wert legte) vielfach vollständig übersehen worden oder in Vergessenheit geraten zu sein scheint. Erst vor einigen Jahren ist es von J. Hadamard (J. de Math. (4) 8 [1892], p. 107) von neuem entdeckt worden und wird seitdem öfters als „Hadamard'scher Satz“ zitiert. — Auf der anderen Seite hat sich, trotz der tadellos korrekten Fassung des Kriteriums (I) und der ausdrücklichen Betonung seines spezielleren Charakters, zum Teil die Meinung gebildet, dass durch die drei Annahmen $\lim \frac{a_{v+1}}{a_v} \leq 1$ alle in Betracht kommenden Möglichkeiten erschöpft seien, oder dass zum mindesten die Konvergenz von $\sum a_v$ im Falle der Nicht-Existenz eines bestimmten $\lim \frac{a_{v+1}}{a_v}$ als eine besondere Merkwürdigkeit erscheine

(vgl. meine Bemerkungen Math. Ann. 35 [1890], p. 308). Und man findet darnach in manchen (sogar der neuesten Zeit angehörigen) Lehrbüchern die ganze Lehre von den Potenzreihen auf die viel zu spezielle Annahme begründet, dass

$$\lim \left| \frac{a_{v+1}}{a_v} \right| \text{ existiere.}$$

$$(16) \quad \lim \frac{1}{\lg v} \left\{ \begin{array}{l} < 0: \text{Divergenz,} \\ > 0: \text{Konvergenz.} \end{array} \right.$$

An anderer Stelle¹⁶⁹⁾ zeigt *Cauchy*, dass die Div. oder Konv. der Reihe $\sum_m^\infty f(v)$ unter gewissen Bedingungen mit derjenigen des Integrals $\int_m^\infty f(x) dx$ zusammenfällt, und gewinnt hieraus das *Kriterienpaar*:

$$(17) \quad \left\{ \begin{array}{l} \lim v \cdot a_v > 0: \text{Divergenz,} \\ \lim v^{1+\varrho} \cdot a_v = 0: \text{Konvergenz, } (\varrho > 0), \end{array} \right.$$

welches, beiläufig bemerkt, leicht als im wesentlichen *gleichwertig* mit dem *disjunktiven Doppelkriterium* (16) erkannt wird und einfacher direkt aus dem Verhalten der Reihe $\sum \frac{1}{v^{1+\varrho}}$ ($\varrho > 0$) hätte abgeleitet werden können. Wichtiger dünkt mir, dass *C.* hier zum ersten Male die *Divergenz* von $\sum \frac{1}{v \lg v}$, die *Konvergenz* von $\sum \frac{1}{v (\lg v)^{1+\varrho}}$ für $\varrho > 0$ beweist, womit der Weg für die weitere Verschärfung der Kriterien (16) und (17) unmittelbar vorgezeichnet erscheint.

24. Kummer's allgemeine Kriterien. Die Kriterien von *J. L. Raabe*, *J. M. C. Duhamel*, *de Morgan*, *Bertrand*, *P. O. Bonnet*, *M. G. r. Paucker* (deren Veröffentlichung in den Zeitraum von 1832—1851 fällt und von denen später noch die Rede sein wird) liefern lediglich derartige *Verschärfungen* der *Cauchy'schen* Kriterien, an welche sie auch nach Form und Herleitungsweise sich im wesentlichen anschliessen.

Während alle die bisher genannten Kriterien einen *speziellen* Charakter tragen, insofern sie durchweg auf der Vergleichung von a_v mit einer der *speziellen* Zahlenfolgen a^v , v^v , $v \cdot (\lg v)^v$ etc. beruhen, so hat *E. E. Kummer*¹⁷⁰⁾ das folgende *Konvergenz*-Kriterium von überraschend *allgemeinem* Charakter abgeleitet: $\sum a_v$ konvergiert, wenn irgend eine positive Zahlenfolge (P_v) ¹⁷¹⁾ existiert, so dass:

$$(18) \quad \lim \lambda_v \equiv \lim \left(P_v \cdot \frac{a_v}{a_{v+1}} - P_{v+1} \right) > 0.$$

169) *Anc. Exerc.* 2 (1827), p. 221 ff. — Der Satz über den Zusammenhang des Integrals mit der Reihe findet sich in geometrischer Form schon bei *Colin Mac Laurin* (*Treatise of fluxions* 1742, p. 289). — Über die Umformung dieses Krit. durch *B. Riemann*, vgl. Nr. 36.

170) *J. f. Math.* 13 (1835), p. 171 ff.

171) *Kummer* fügt noch die Nebenbedingung hinzu: $\lim P_v \cdot a_v = 0$, welche jedoch in Wahrheit überflüssig ist, wie *Dini* in einer sogleich zu erwähnenden Arbeit zuerst gezeigt hat.

Zugleich zeigt K , dass $\sum a_n$ divergiert, wenn:

$$(19) \quad \lim P_n \cdot a_n = 0,^{172)} \quad \lim \lambda_n = 0, \quad \lim \frac{P_n \cdot a_n}{\lambda_n} > 0,$$

und weist nach, dass allemal wirklich (unendlich viele) Zahlenfolgen (P_n) existieren, welche eins der Kriterien (18) (19) befriedigen; um sie aber in jedem Falle bestimmen zu können, müsste man von vornherein über die Konvergenz und Divergenz von $\sum a_n$ orientiert sein.

25. Die Theorien von Dini, du Bois-Reymond und Pringsheim.

Erhebliche Verallgemeinerungen der ganzen Lehre von den Konvergenzkriterien bringt sodann *Dini's* umfangreiche, zunächst unmittelbar an *Kummer's* Untersuchung anknüpfende Abhandlung: *Sulle serie a termini positivi*¹⁷³⁾, welche indessen nicht die verdiente Verbreitung gefunden zu haben scheint.

Du Bois-Reymond's „Neue Theorie der Konvergenz und Divergenz von Reihen mit positiven Gliedern“¹⁷⁴⁾ scheint ganz unabhängig von *Dini's* Arbeit entstanden zu sein. Sind auch seine Untersuchungsmethoden und Hauptresultate von denjenigen *Dini's* nicht wesentlich verschieden, so geht er doch *prinzipiell* über *Dini* hinaus durch die ausgesprochene Tendenz, der Lehre von der Konvergenz und Divergenz „durch strengere Begründung und durch sachgemässe Verknüpfung ihrer Theoreme den bis jetzt ihr fehlenden Charakter einer mathematischen Theorie zu verleihen“. Da mir indessen *Du Bois-Reymond* dieses Ziel keineswegs erreicht zu haben scheint¹⁷⁵⁾, so habe ich das von ihm gestellte Problem von neuem aufgenommen und in folgendem Sinne erledigt¹⁷⁶⁾: Es werden aus dem völlig einheitlich durchgeführten, nächstliegenden Prinzip der Reihenvergleichung Regeln von möglicher Allgemeinheit abgeleitet, welche nicht nur alle bisher bekannten Kriterien als spezielle Fälle umfassen¹⁷⁷⁾, sondern auch ihre Tragweite

172) Hier ist diese Bedingung *wesentlich*.

173) Pisa 1867 (Tipogr. Nistri). Auch: Ann. dell' Univ. Tosc. 9 (1867), p. 41—76.

174) J. f. Math. 76 (1873), p. 61—91.

175) Vgl. meine krit. Bemerk. Math. Ann. 35 (1890), p. 298.

176) Math. Ann. 35 (1890), p. 297—394. — Nachtrag dazu: Math. Ann. 39 (1891), p. 125. — Ein Auszug dieser Theorie findet sich: Math. Pap. Congr. Chicago [1896] 1893, p. 305—329.

177) Eine Ausnahme bildet das *Kummer'sche* Divergenz-Kriterium, weil es nicht, wie alle anderen Kriterien von *einer*, sondern von *drei* Bedingungen abhängt. Dasselbe wird aber durch die allgemeineren Div.-Kriterien 2^{ter} Art vollkommen entbehrlich. Vgl. meine Abh. a. a. O. p. 365, Fussn.

und ihren mehr oder weniger verborgenen Zusammenhang deutlich erkennen lassen. Insbesondere erscheint das in seiner Allgemeinheit bisher vollständig abseits stehende Konvergenzkriterium *zweiter Art* von *Kummer* als ein natürliches Glied dieser Theorie und findet sein vollständiges Analogon unter den Kriterien *erster Art*.

26. Die Kriterien erster und zweiter Art. Ich bezeichne mit $d_v \equiv D_v^{-1}$ bzw. $c_v \equiv C_v^{-1}$ das allgemeine Glied einer als *divergent* bzw. *konvergent* erkannten, mit a_v dasjenige einer zu beurteilenden Reihe. Dann ergibt sich als *Hauptform* der Kriterien *erster und zweiter Art*:

$$(20) \quad \begin{cases} \lim D_v \cdot a_v > 0: \text{Divergenz,} \\ \lim C_v \cdot a_v < \infty: \text{Konvergenz}^{178).} \end{cases}$$

$$(21) \quad \begin{cases} \lim (D_v \cdot \frac{a_v}{a_{v+1}} - D_{v+1}) < 0: \text{Divergenz,} \\ \lim (C_v \cdot \frac{a_v}{a_{v+1}} - C_{v+1}) > 0: \text{Konvergenz.} \end{cases}$$

Man kann diesen Kriterien mannigfaltige *andere Formen* geben, wenn man nicht a_v direkt mit d_v, c_v , sondern $F(a_v)$ mit $F(d_v), F(c_v)$ vergleicht, unter F eine *monotone* Funktion verstanden. Hierauf beruht insbesondere die Umformung der *Kriterienpaare* (20) in *disjunktive Doppelkriterien*, bei denen ein *einziger* Ausdruck über Divergenz und Konvergenz entscheidet.

Versagt für irgend eine bestimmte Wahl von D_v, C_v eins jener Kriterien in der Weise, dass an Stelle der Zeichen $<$ das Gleichheitszeichen auftritt, so ergibt sich die *Möglichkeit*, *wirkksamere* Kriterien zu erhalten, wenn man statt D_v, C_v solche $\overline{D}_v, \overline{C}_v$ einführt, welche der Bedingung: $\overline{D}_v < D_v$ bzw. $\overline{C}_v > C_v$ genügen, in welchem Falle die Reihe $\sum \overline{D}_v^{-1}$ bzw. $\sum \overline{C}_v^{-1}$ *schwächer* divergent bzw. konvergent heißen soll, als $\sum D_v^{-1}$ bzw. $\sum C_v^{-1}$.¹⁷⁹⁾ Man kann aber solche D_v, C_v nicht nur in unbegrenzter Anzahl, sondern *alle überhaupt möglichen* mit Hülfe der folgenden Sätze herstellen:

Ist $0 < M_v < M_{v+1}$, $\lim M_v = \infty$, so stellt jeder der drei Ausdrücke

178) Die Bezeichnung: $< \infty$ bedeutet: *nicht ∞* , also *unter einer endlichen Schranke*. Ferner bemerke man, dass \lim hier im Sinne von \lim steht, d. h. es braucht keineswegs ein *bestimmter Limes* von der fraglichen Beschaffenheit zu existieren.

179) Der Begriff der „schwächeren“ Divergenz und Konvergenz lässt sich allgemeiner fassen. Vgl. S. 200, 210, 212.

$$(22) \quad (a) \ M_{v+1} - M_v, \quad (b) \ \frac{M_{v+1} - M_v}{M_v}, \quad (c) \ \frac{M_{v+1} - M_v}{M_{v+1}}$$

ein d_v dar, und umgekehrt lässt sich jedes d_v in der Form (a), (b) und im Falle $d_v < 1$ auch in der Form (c) darstellen¹⁸⁰).

Ferner stellt der Ausdruck:

$$(23) \quad \frac{M_{v+1} - M_v}{M_{v+1} \cdot M_v}$$

ein c_v dar — *vice versa*.

Dabei divergieren bzw. konvergieren die betreffenden Reihen um so *schwächer*, je *langsamer* M_v mit v zunimmt¹⁸¹).

Durch Einführung von M_v^ϱ ($0 < \varrho < 1$) an Stelle von M_v erkennt man mit Hülfe der Beziehung:

$$(24) \quad \frac{M_{v+1}^\varrho - M_v^\varrho}{M_{v+1}^\varrho \cdot M_v^\varrho} \sim \frac{M_{v+1} - M_v}{M_{v+1} \cdot M_v^\varrho} \sim \frac{M_{v+1} - M_v}{M_{v+1}^{1+\varrho}}$$

jeden dieser Terme als allgemeines Glied einer *konvergenten* Reihe¹⁸²). Sodann liefert die Substitution von $\lg_x M_v$ ($x = 1, 2, 3, \dots$) und (24), wenn man setzt:

$$(25) \quad x \cdot \lg_1 x \cdot \lg_2 x \cdots \lg_x x = L_x(x),$$

mit Hülfe elementarer infinitärer Relationen die beiden unbegrenzt fortsetzbaren Folgen:

$$(26) \quad (a) \ \frac{M_{v+1} - M_v}{L_x(M_v)}, \quad (b) \ \frac{M_{v+1} - M_v}{L_x(M_{v+1}) \cdot (\lg_x M_{v+1})^\varrho} \quad (\varrho > 0, \ x = 1, 2, 3, \dots)$$

als allgemeine Glieder von beständig *schwächer* divergierenden bzw. konvergierenden Reihen. Diese Ausdrücke enthalten für $x = 0$ die

180) Die Vergleichung der Ausdrücke (22) (b) und (c) mit (a) zeigt unmittelbar, dass es zu *jeder* divergenten Reihe *schwächer* divergierende giebt. Setzt man $M_{v+1} - M_v = d_v$, $M_0 = 0$, also: $M_{v+1} = d_0 + d_1 + \cdots + d_v = s_v$, so

folgt: Mit der Reihe $\sum d_v$ divergiert auch $\sum \frac{d_v}{s_{v+1}}$ (Satz von Abel: J. f. Math. 3 [1828], p. 81) und $\sum \frac{d_v}{s_v}$ (Dini a. a. O. p. 8).

181) Man kann geradezu M_v als das *Mass* der Divergenz bzw. Konvergenz von $\sum (M_{v+1} - M_v)$ bzw. $\sum \frac{M_{v+1} - M_v}{M_{v+1} \cdot M_v}$ bezeichnen. Vgl. Du Bois-Reymond a. a. O. p. 64.

182) Daraus folgt mit Anwendung der unmittelbar zuvor gebrauchten Bezeichnungen, dass $\sum \frac{d_v}{s_v^{1+\varrho}}$ konvergiert. Auch dieser Satz findet sich schon bei Abel (in der oben erwähnten nachgelassenen Note: 2, p. 198), ausserdem bei Dini (a. a. O. p. 8).

entsprechenden Anfangsterme in (22), (24), wenn noch $L_0(x) = \lg_0 x = x$ gesetzt wird. Auch kann man in dem Nenner des Ausdruckes (26b) M_{v+1} ohne weiteres durch M_v ersetzen, wenn man die für die Bildung von Kriterien sich zweckmässig erweisende Beschränkung $M_{v+1} \sim M_v$ einführt.

27. Fortsetzung. Hiernach ist die *Hauptform aller überhaupt möglichen Kriterien erster Art* in den beiden Beziehungen enthalten:

$$(27) \quad \begin{cases} \lim \frac{M_v}{M_{v+1} - M_v} \cdot a_v > 0: \text{Divergenz,} \\ \lim \frac{M_{v+1} \cdot M_v}{M_{v+1} - M_v} \cdot a_v < \infty: \text{Konvergenz,} \end{cases}$$

und es stellen die Beziehungen:

$$(28) \quad \begin{cases} \lim \frac{L_x(M_v)}{M_{v+1} - M_v} \cdot a_v > 0: \text{Divergenz,} \\ \lim \frac{L_x(M_v) \cdot \lg_x M_v}{M_{v+1} - M_v} \cdot a_v < \infty: \text{Konvergenz} \end{cases} \quad \left(\begin{matrix} M_{v+1} \sim M_v \\ \varrho > 0 \end{matrix} \right)$$

für $x = 0, 1, 2, \dots$ eine Skala von immer *wirksameren* Kriterien dar. Die spezielle Wahl $M_v = v$ liefert alsdann für $x = 0$ das *Cauchy'sche* Kriterium (17), für $x = 1, 2, \dots$ jene Serie, welche zuerst von *de Morgan*¹⁸³⁾, später von *Bonnet*¹⁸⁴⁾ aufgestellt wurde.

Die Kriterien (28) lassen sich auch durch die folgende Skala von *disjunktiven* Kriterien¹⁸⁵⁾ ersetzen:

$$(29) \quad \begin{cases} (a) \lim \frac{\lg \frac{M_{v+1} - M_v}{a_v}}{M_v} \begin{cases} < 0 \text{ Divergenz,} \\ > 0 \text{ Konvergenz,} \end{cases} \\ (b) \lim \frac{\lg \frac{M_{v+1} - M_v}{L_x(M_v) \cdot a_v}}{L_{x+1}(M_v)} \begin{cases} < 0 \text{ Divergenz,} \\ > 0 \text{ Konvergenz.} \end{cases} \quad (x = 0, 1, 2, \dots). \end{cases}$$

Spezialisiert man wiederum $M_v = v$, so liefert (a) das *Cauchy'sche* Fundam.-Kriterium (I), (b) für $x = 0$ das *Cauchy'sche* Kriterium (16), für $x = 1, 2, \dots$ eine zuerst von *Bertrand*¹⁸⁶⁾ abgeleitete Serie.

183) Diff. and Integr. Calc. (1839), p. 326. *De Morgan* leitet daraus noch eine andere scheinbar allgemeinere Kriterienform ab, deren Tragweite indessen genau dieselbe ist, wie *Bertrand* und *Bonnet* (J. de Math. 7, p. 48; 8, p. 86) gezeigt haben.

184) J. de Math. 8 (1843), p. 78.

185) In etwas anderer Form abgeleitet von *Dini* a. a. O. p. 14.

186) J. de Math. 7 (1842), p. 37. — Eine elementare Ableitung giebt *Paucker* (J. f. Math. 42 [1851] p. 120) und *Cauchy* (Cours d'Alg. 2. Aufl. p. 100).

Schliesslich gestattet das in (a) enthaltene *Konvergenz-Kriterium* noch die folgende Verallgemeinerung:

$$(30) \quad \lim \frac{\lg P_v \cdot a_v}{s_v} < 0: \text{Konvergenz,}^{187})$$

wo (P_v) jede beliebige positive Zahlenfolge bedeuten kann und

$$s_v = P_0 + P_1 + \dots + P_v.$$

Dieses *allgemeinste Konvergenzkriterium erster Art* bildet dann das Analogon zum *Kummer'schen Konvergenzkriterium zweiter Art*.

Durch Einsetzen des allgemeinen Ausdrucks (23) für C_v^{-1} in das *Konvergenz-Kriterium zweiter Art* (21) ergibt sich das merkwürdige Resultat, dass dasselbe auch auf die Form gebracht werden kann:

$$(31) \quad \lim (D_v \cdot \frac{a_v}{a_{v+1}} - D_{v+1}) > 0: \text{Konvergenz.}$$

Da jede beliebige positive Zahlenfolge (P_v) entweder der Gattung (D_v) oder der Gattung (C_v) angehören muss, so findet man durch Kombination von (31) mit dem *Konvergenz-Kriterium* (21) unmittelbar das *Kummer'sche Konvergenz-Krit.* (18), mit dem *Divergenz-Krit.* (21) das *disjunktive Krit. zweiter Art*:

$$(32) \quad \lim (D_v \cdot \frac{a_v}{a_{v+1}} - D_{v+1}) \begin{cases} < 0: \text{Divergenz,} \\ > 0: \text{Konvergenz,} \end{cases}$$

in welches man nur aus (22a), (26a):

$$(33) \quad D_v = \frac{1}{M_{v+1} - M_v} \quad \text{bzw.} \quad D_v = \frac{L_x(M_v)}{M_{v+1} - M_v} \quad (x = 0, 1, 2, \dots)$$

einzusetzen hat, um *Skalen* von immer wirksameren¹⁸⁸⁾ Kriterien zu erhalten. Für $M_v = v$ resultiert daraus der Reihe nach das *Cauchy'sche Fund.-Krit.* (II), das *Raabe'sche*¹⁸⁹⁾ und (abgesehen von einem un-

welcher bei dieser Gelegenheit mit Recht den Grundgedanken und die benützten Methoden für sich reklamiert.

$$187) \text{ Anders geschrieben: } \lim (P_v \cdot a_v)^{\frac{1}{s_v}} < 1.$$

188) Über den (hier nicht so unmittelbar wie bei den Kriterien erster Art ersichtlichen) Charakter der successive zu erzielenden *Verschärfung* s. meine Abhandl. a. a. O. p. 364.

189) Z. f. Phys. u. Math. von Baumgartner u. Ettingshausen 10 (1832), p. 63. Wieder entdeckt von Duhamel, J. de Math. 4 (1839), p. 214. Vgl. auch 6 (1841), p. 85. — Das fragliche Kriterium lässt sich auf die Form bringen:

$$\lim v \left(\frac{a_v}{a_{v+1}} - 1 \right) \begin{cases} < 1: \text{Divergenz,} \\ > 1: \text{Konvergenz.} \end{cases}$$

wesentlichen Unterschied in der Form) eine gleichfalls von *Bertrand*¹⁹⁰⁾ aufgestellte Kriterienfolge.

Neben der *Hauptform* (32) des *disjunkt. Krit. zweiter Art* habe ich als besonders einfach und von gleicher Tragweite noch die folgende hervorgehoben:

$$(34) \quad \lim D_{v+1} \lg \frac{D_v a_v}{D_{v+1} a_{v+1}} \begin{cases} < 0: \text{Divergenz,} \\ > 0: \text{Konvergenz.} \end{cases}$$

Auch hier erweist es sich als zulässig, in dem *Konv.-Krit.* die D_v durch die Terme einer ganz beliebigen positiven Zahlenfolge (P_v) zu ersetzen, so dass ein Kriterium von gleicher Allgemeinheit wie das *Kummer'sche* resultiert.

28. Andere Kriterienformen. Die Lehre von den *Kriterien erster und zweiter Art* darf als vollkommen abgeschlossen gelten. Wenn nichtsdestoweniger von Zeit zu Zeit immer wieder „neue“ solche Kriterien auftauchen, so handelt es sich dabei entweder um die Wiederentdeckung längst bekannter Kriterien oder um Spezialbildungen von untergeordneter Bedeutung.

Andererseits ergibt sich die unbegrenzte Möglichkeit weiterer allgemeiner Kriterienbildungen, wenn man statt der a_v oder $\frac{a_v}{a_{v+1}}$ irgendwelche andere, passend gewählte Verbindungen $P'(a_v, a_{v+1}, \dots)$ mit den entsprechenden der d_v bzw. c_v vergleicht. Auf diesem Prinzip beruhen die von mir aufgestellten Kriterien *dritter Art* (*Differenzenkrit.*)¹⁹¹⁾, sowie die „*erweiterten Kriterien zweiter Art*“, bei denen statt der Quotienten zweier *consecutiver* diejenigen zweier *beliebig entfernt* Glieder oder auch diejenigen zweier *Gliedergruppen* in Betracht gezogen werden. Ich gelange auf dem letzteren Wege zu dem folgenden *erweiterten Hauptkriterium zweiter Art*:

$$(35) \quad \begin{cases} \lim_{x=\infty} \frac{(M_{x+h} - M_x) \cdot f(M_{x+h})}{(m_{x+h} - m_x) \cdot f(m_x)} > 1: \text{Divergenz der Reihe } \sum f(v), \\ \lim_{x=\infty} \frac{(M_{x+h} - M_x) \cdot f(M_x)}{(m_{x+h} - m_x) \cdot f(m_{x+h})} < 1: \text{Konvergenz „ „ „} \end{cases}$$

190) J. de Math. 7, p. 43. Vgl. auch: *Bonnet*, J. de Math. 8, p. 89 und *Paucker*, J. f. Math. 42, p. 143. — Die *Gauss'schen* Kriterien lassen sich mit Hilfe des *Raabe'schen* und des *ersten Bertrand'schen* Kriteriums ableiten, wie *B. a. a. O.* p. 52 gezeigt hat; übrigens auch mit Hilfe der *Kummer'schen* Kriterien (*Kummer* a. a. O. p. 178). — Das analoge gilt für den etwas allgemeineren Fall: $\frac{a_{v+1}}{a_v} = 1 + \frac{c_1}{v} + \frac{c_2}{v^2} + \dots$, nach *O. Schlömilch*, Z. f. Math. 10 (1865), p. 74.

191) A. a. O. p. 379.

wenn $M_x > m_x$ und M_x, m_x monoton zunehmende, $f(x)$ eine monoton abnehmende Funktion der positiven Veränderlichen x bedeuten. Aus demselben ergeben sich für $h=1$ die von *G. Kohn*¹⁹²⁾ abgeleiteten Kriterien, für $\lim h=0$ die durch formale Einfachheit und grosse Tragweite ausgezeichneten Kriterien von *Ermakoff*¹⁹³⁾:

$$(36) \quad \lim_{x=\infty} \frac{M'_x \cdot f(M_x)}{m'_x \cdot f(m_x)} \begin{cases} > 1: \text{Divergenz,} \\ < 1: \text{Konvergenz,} \end{cases}$$

Die letzteren habe ich neuerdings in der Weise verallgemeinert, dass $f(x)$ nicht mehr als *monoton* vorausgesetzt zu werden braucht¹⁹⁴⁾.

29. Tragweite der Kriterien erster und zweiter Art. Das Anwendungsgebiet irgend eines Kriteriums *zweiter Art* ist naturgemäss ein merklich *engeres*, als dasjenige des entsprechenden (d. h. mit demselben D_v, C_v gebildeten) Kriteriums *erster Art*¹⁹⁵⁾. *Cauchy* hat auf Grund des in Nr. 18 Gl. (9) erwähnten Grenzwertsatzes den Zusammenhang zwischen seinen Fundam.-Krit. erster und zweiter Art genauer festgestellt. Das betreffende Resultat lässt sich in folgender Weise verallgemeinern: Liefert das disjunktive Kriterium *zweiter Art* (32) für $D_v^{-1} = M_{v+1} - M_v$ eine *Entscheidung* oder *versagt* es durch Auftreten des Grenzwertes *Null*, so gilt das gleiche von dem Kriterium *erster Art* (29 a). Dagegen *kann* das *letztere* noch eine Entscheidung liefern, wenn das *erstere* durch das Auftreten von *Unbest.-Grenzen versagt*¹⁹⁶⁾.

Die Grenzen für die Tragweite der gewöhnlichen *Kriterienpaare erster Art* (20) ergeben sich aus der Bemerkung, dass dieselben nicht nur versagen, wenn geradezu:

$$(A) \quad \lim D_v \cdot a_v = 0, \quad \lim C_v \cdot a_v = \infty,$$

sondern auch dann, wenn jene Grenzwerte überhaupt *nicht existieren* und *gleichzeitig*:

$$(B) \quad \underline{\lim} D_v a_v = 0, \quad \overline{\lim} C_v \cdot a_v = \infty.$$

192) Archiv f. Math. 67 (1882), p. 82. 84.

193) *Darboux* Bulletin 2 (1871), p. 250; 18 (1883), p. 142. — Das für $M_x = e^x, m_x = 1$ resultierende Kriterium: $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{e^x f(e^x)}{f(x)} \geq 1$ besitzt z. B. dieselbe Tragweite, wie die *ganze Skala* der logarithmischen Kriterien.

194) Chicago Papers p. 328. Dasselbst auch ein kürzerer, auf der Theorie der bestimmten Integrale beruhender Beweis (Verbesserung des ursprünglich von *W. Ermakoff* gegebenen) und genauere Feststellung der Beziehung zwischen

$\sum_m f(v)$ und $\int_m^\infty f(x) dx$.

195) Vgl. a. a. O. p. 308.

196) *Prinastheim* a. a. O. p. 278

Wählt man, wie bei den in der Praxis ausschliesslich angewendeten Kriterien geschieht, die D_v , C_v *monoton* zunehmend¹⁹⁷⁾, so erstreckt sich ihre Anwendbarkeit offenbar nur auf solche a_v , die entweder geradezu *monoton* oder doch „im wesentlichen“ *monoton* abnehmen, d. h. so, dass die etwaigen Schwankungen innerhalb gewisser Grenzen bleiben.

30. Die Grenzgebiete der Divergenz und Konvergenz. Das erste Beispiel einer *konvergenten* Reihe, für welche die gewöhnliche logarithmische (*Bonnet'sche*) Skala nach dem Modus von Gl. (A) *versagt*, hat *Du Bois-Reymond* konstruiert¹⁹⁸⁾. Ich habe sodann einen etwas allgemeineren Reihentypus von durchsichtigerem Bildungsgesetz angegeben, welcher zugleich auch *divergente* Reihen von der fraglichen Beschaffenheit liefert¹⁹⁹⁾. Die hierbei benützte Methode lässt sich, wie *Hadamard* gezeigt hat²⁰⁰⁾, leicht auf jede *beliebige* Kriterienskala übertragen.

Es giebt aber auch unendlich viele *monotone* a_v , für welche eine beliebig gewählte Kriterienskala im Sinne der Gleichungen (B) vollkommen versagen muss. Die von mir in dieser Richtung angestellten Untersuchungen²⁰¹⁾ führen zu dem folgenden allgemeinen Satze: „Wie *stark* auch $\sum C_v^{-1}$ *konvergieren* möge, so giebt es stets *monotone divergente* Reihen $\sum a_v$, für welche: $\lim C_v a_v = 0$. Wie *langsam* auch m_v mit v ins Unendliche wachsen möge, so existieren stets *monotone konvergente* Reihen $\sum a_v$, für welche: $\lim v \cdot m_v \cdot a_v = \infty$; dagegen hat man stets: $\lim v \cdot a_v = 0$.“ Es giebt also überhaupt kein M_v von *beliebig hohem Unendlich*, so dass $\lim M_v \cdot a_v > 0$ eine *notwendige* Bedingung für die *Divergenz* von $\sum a_v$ bildet. Andererseits bildet zwar die Beziehung $\lim v \cdot a_v = 0$ eine *notwendige*²⁰²⁾ Bedingung für die

197) Z. B.

$$D_v = v, \quad v \lg v, \quad \dots$$

$$C_v = v^{1+q}, \quad v \cdot (\lg v)^{1+q}, \quad \dots$$

(Bonnet'sche Kriterien: s. Nr. 27).

198) J. f. Math. 76 (1873), p. 88.

199) A. a. O. p. 353 ff.

200) Acta Math. 18 (1894), p. 325.

201) A. a. O. p. 347. 356. Math. Ann. 37 (1890), p. 600. Münch. Ber. 26 (1896), p. 609 ff.

202) Dass dieselbe für die Konvergenz stets auch *hinreichende*, ist von *Th. Olivier* (J. f. Math. 2, 1827, p. 34) behauptet, von *Abel* (a. a. O. 3, p. 79. Oeuvres 1, p. 399) durch den Hinweis auf die Reihe $\sum \frac{1}{v \lg v}$ widerlegt worden. *Kummer* hat dagegen gezeigt, dass diese Bedingung

Konvergenz von $\sum a_v$, dagegen *keine*²⁰³⁾ Beziehung von der Form: $\lim v \cdot m_v \cdot a_v = 0$ bei *beliebig schwachem Unendlich* von $\lim m_v$. Mit anderen Worten: Es existiert, auch wenn man sich auf die Betrachtung *monotoner*²⁰⁴⁾ a_v beschränkt, überhaupt *keine Schranke* der Divergenz, d. h. *keine* Zahlenfolge (c_v) , so dass von irgend einem bestimmten v an *beständig* $a_v > c_v$ sein müsste, wenn $\sum a_v$ *divergiert*. Und es bildet zwar jede Zahlenfolge von der Form $\left(\frac{\varepsilon}{v}\right)$, wo $\varepsilon > 0$, eine *Schranke* der Konvergenz (d. h. es muss von irgend einem bestimmten v an *beständig* $a_v < \frac{\varepsilon}{v}$ sein, wenn $\sum a_v$ *konvergieren* soll), dagegen *keine* Zahlenfolge von der Form $\left(\frac{\varepsilon_v}{v}\right)$, wie *langsam* auch ε_v mit $\frac{1}{v}$ der Null zustreben möge.

Hiernach beruht die von Du Bois-Reymond eingeführte²⁰⁵⁾ Fiktion einer „Grenze zwischen Konvergenz und Divergenz“ von vornherein auf einer falschen Grundanschauung. Aber auch wenn man dieselbe in wesentlich engerem Sinne auffasst, nämlich als präsumtive Grenze zwischen irgend zwei *bestimmten* divergenten und konvergenten Skalen, wie: $\frac{1}{L_x(v)}$ und $\frac{1}{L_x(v) \cdot (\lg_x v)^q}$ ($x = 1, 2, 3, \dots; q < 0$), erscheint sie unhaltbar, wie ich des näheren nachzuweisen versucht habe²⁰⁶⁾.

31. Bedingte und unbedingte Konvergenz. Eine Reihe mit *positiven* und *negativen* Gliedern u_v heisst *absolut* konvergent, wenn $\sum |u_v|$ *konvergiert*; dass sie unter dieser Voraussetzung wirklich auch *selbst* allemal *konvergiert*, ist, wie schon in Nr. 23 bemerkt wurde, von Cauchy bewiesen worden. Dass es aber auch *konvergente* Reihen $\sum u_v$ giebt, für welche $\sum |u_v|$ *divergiert*, hatte bereits das Beispiel

reicht, wenn $\frac{a_v}{a_{v+1}}$ sich nach steigenden Potenzen von $\frac{1}{v}$ entwickeln lässt (J. f. Math. 13, 1835, p. 178).

203) Man findet vielfach den *falschen* Satz (vgl. meine Conv.-Theorie a. a. O. p. 343), dass *allgemein*: $\lim D_v \cdot a_v = 0$ eine *notwendige* Bedingung für die Konvergenz bilde, während für $D_v \gg v$ in Wahrheit nur: $\lim D_v \cdot a_v = 0$ zu sein braucht. Diese einzig richtige Formulierung giebt schon Abel in der oben zitierten nachgelassenen Note: Oeuvres 2, p. 198.

204) Für *nicht-monotone* a_v erscheint die Existenz derartiger Konvergenz- und Divergenzschranken *a priori* ausgeschlossen; s. meine Conv.-Theorie a. a. O. p. 344. 357.

205) Münch. Abh. 12 (1876), p. XV. Math. Ann. 11 (1877), p. 158 ff.

der *Leibniz*'schen Reihe²⁰⁷): $\frac{\pi}{4} = 1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \dots$ gelehrt. Auch hat *Leibniz* allgemein die *Konvergenz* jeder Reihe von der Form $\sum (-1)^v \cdot a_v$ (wo $a_v \geq a_{v+1} > 0$, $\lim a_v = 0$) erwiesen²⁰⁸). An derartige Reihen, speziell an $\sum (-1)^v \cdot \frac{1}{v+1}$, hat *Cauchy* die wichtige Bemerkung geknüpft²⁰⁹), dass ihre *Konvergenz wesentlich von der Anordnung der Glieder* abhängt, derart, dass sie bei gewissen Umordnungen *divergent* werden. Hiermit hat er diejenige Eigenschaft aufgedeckt, welche man heute als *bedingte* Konvergenz zu bezeichnen pflegt. *Lej-Dirichlet* hat hinzugefügt²¹⁰), dass bei gewissen Umordnungen die *Konvergenz* zwar erhalten bleibt, die *Summe* dagegen eine Veränderung erleidet; und er hat insbesondere scharf hervorgehoben, dass eine *absolut* konvergente Reihe stets *unbedingt*, d. h. unabhängig von der Anordnung der Glieder gegen dieselbe Summe konvergiert²¹¹). Durch *Cauchy* und *Dirichlet* war immerhin nur so viel erwiesen worden, dass gewisse nicht-absolut konvergierende Reihen nur *bedingt* konvergieren; dass dies in Wahrheit bei jeder nicht-absolut konvergierenden Reihe der Fall sein muss, lehrte erst ein von *Riemann* bewiesener Satz²¹²), wonach sich zwei beliebige *divergente* Reihen von der Form $\sum a_v$, $\sum (-b_v)$ ($a_v > 0$, $b_v > 0$, $\lim a_v = \lim b_v = 0$) zu einer *konvergenten* Reihe mit beliebig vorzuschreibender Summe vereinigen lassen²¹³). Damit erscheint die vollkommene Äquivalenz von

207) De vera proportionem circuli ad quadratum circumscriptum. Acta erud. Lips. 1682. (Opera, Ed. Dutens 3, p. 140.) Die Reihe findet sich schon bei *James Gregory*. Vgl. *Reiff* a. a. O. p. 45. *M. Cantor* 3, p. 72.

208) Brief an *Joh. Bernoulli*, 1. Jan. 1714. (Commerce. épist. 2, p. 329.)

209) Résumé anal. p. 57.

210) Berl. Abh. 1837, p. 48. (Ges. W. 1, p. 318.)

211) Ausdrücklich bewiesen wurde dies wohl zum ersten Male von *W. Scheibner*: Über unendliche Reihen und deren Konvergenz. Gratulationsschrift, Lpzg. 1860, p. 11. — Der Ausdruck „*unbedingte*“ Konvergenz dürfte von *Weierstrass* stammen (*J. f. Math.* 51 [1856], p. 41). — Einzelne deutsche und fast alle französischen und englischen Autoren bezeichnen die *bedingt* konvergenten Reihen als *semikonvergent*. Dieser Ausdruck ist an sich wenig passend (denn der Zusatz „*semi*“ bezeichnet nicht sowohl einen besonderen Modus, als vielmehr die partielle Negation der Konvergenz) und erscheint auch schon aus dem Grunde wenig empfehlenswert, weil er (bezw. der damit synonyme *halbkonvergente* Reihe, *série demi-convergente*) nach dem Vorgange von *Legendre* (*Exerc. de calc. integr.* 1, p. 267) bereits eine völlig andere Bedeutung erlangt hat. Vgl. Nr. 38.

212) Gött. Abh. 13 (1867). (Ges. W. p. 221.)

213) *Dini* hat bemerkt, dass man auch zwei Reihen $\sum a_v$, $\sum b_v$ mit $a_v > 0$, $b_v > 0$, $\lim a_v = \lim b_v = 0$ vereinigen kann.

absoluter und *unbedingter*, *nicht-absoluter* und *bedingter* Reihenkonvergenz endgültig festgestellt.

32. Wertveränderungen bedingt konvergenter Reihen. Für die *Veränderung*, welche die harmonische Reihe

$$\sum_{v=0}^{\infty} (-1)^v \cdot \frac{1}{v+1} = \lg 2$$

erleidet, falls man auf je p positive Glieder je q negative folgen lässt, wurde von *Mart. Ohm* (mit Hülfe der Integralrechnung) der Wert $\frac{1}{2} \lg \frac{p}{q}$ gefunden²¹⁴). Eine unmittelbare Verallgemeinerung dieses Resultates bildet der von *Schlömilch* bewiesene²¹⁵) Satz, dass der Reihe $\sum (-1)^v \cdot a_{v+1}$ bei analoger Umstellung die Wertveränderung $(\lim v \cdot a_v) \cdot \frac{1}{2} \lg \frac{p}{q}$ zukommt. Ich habe in ganz allgemeiner Weise untersucht²¹⁶), welche Wertveränderungen eine aus den beiden divergenten Bestandteilen $\sum a_v$, $\sum (-b_v)$ zusammengesetzte konvergente Reihe erleidet, wenn die *relative Häufigkeit* der a_v und $(-b_v)$ (mit Festhaltung der ursprünglichen Reihenfolge innerhalb der beiden einzelnen Gruppen (a_v) und (b_v)) in beliebig vorgeschriebener Weise abgeändert wird, und umgekehrt, welche derartige Umordnung erforderlich ist, um eine beliebig vorgeschriebene Wertveränderung zu erzeugen. Die hierzu erforderliche und für den Fall $\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{a_{v+1}}{a_v} = 1$ vollständig durchführbare Untersuchung „*singulärer Reihenreste*“ von der Form: $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{v=n+1}^{n+\varphi(n)} a_v$ lehrt, dass die fraglichen Wertveränderungen nicht von dem speziellen Bildungsgesetze der a_v , sondern lediglich von deren Verhalten für $\lim v = \infty$ abhängen: Ist $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{v=n+1}^{n+\varphi(n)} a_v = a$ (endlich), so wird auch $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{v=n+1}^{n+\varphi(n)} a'_v = a$, falls $a'_v \sim a_v$; dagegen $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{v=n+1}^{n+\varphi(n)} a'_v = 0$ bzw. $= \infty$, falls $a'_v < a_v$ bzw. $> a_v$. Das zur Erzeugung eines gewissen Restwertes (incl. 0 und ∞) erforderliche $\varphi(n)$ (d. h. schliesslich das zu einer gewissen *Wertveränderung* führende *Umordnungsgesetz*)

214) De nonnullis seriebus summandis. Antr.-Programm, Berlin 1839. — Eine elementare Herleitung bei *H. Simon*, Die harm. Reihe. Dissert. Halle 1886.

215) Z. f. Math. 18 (1873). S. 520.

hängt dann in genau angegebbarer Weise von der infinitären Beschaffenheit der a_v ab. Ist $a_v > \frac{1}{v}$, so erleidet die Reihensumme die Änderung 0, a , ∞ , je nachdem $\lim \varphi(n) \cdot a_n = 0, a, \infty$. Das analoge findet im Falle: $a_v \simeq \frac{g}{v}$ statt, mit dem einzigen Unterschiede, dass die Änderung, falls $\lim \varphi(n) \cdot a_n = a$, hier den Wert: $\frac{1}{g} \lg(1 + ag)$ annimmt. Ist endlich $a_v < \frac{1}{v}$, so liefern die beiden Annahmen $\lim \varphi(n) \cdot a_n = 0$ und $= a$ keine Wertveränderung; im Falle: $\lim \varphi(n) \cdot a_n = \infty$ resultiert dann eine bestimmte endliche oder unendlich grosse Änderung, je nach der besonderen Art des Unendlichwerdens von $\lim \varphi(n) \cdot a_n$.²¹⁷⁾

Einen etwas allgemeineren Typus von Umordnungen, welche die Summe einer bedingt konvergierenden Reihe *unverändert* lassen, hat E. Borel betrachtet²¹⁸⁾.

33. Kriterien für eventuell nur bedingte Konvergenz. Für die Feststellung der *einfachen*, d. h. eventuell nur *bedingten* Konvergenz einer Reihe mit positiven und negativen Gliedern besitzt man keine allgemeinen Kriterien. Das *Mass der Gliederabnahme* ist hier für die Beurteilung der Konvergenz ganz ohne Belang, wie das *Leibniz'sche* Kriterium für alternierende Reihen (Nr. 31) erkennen lässt: $\sum (-1)^v \cdot a_v$ konvergiert, auch wenn die a_v *beliebig langsam* monoton der Null zustreben. Ein in vielen Fällen brauchbares Hilfsmittel giebt die von *Abel*²¹⁹⁾ herrührende Transformation („partielle Summation“):

$$(37) \quad \sum_0^n u_v v_v = \sum_0^{n-1} (u_v - u_{v+1}) \cdot V_v + u_n V_n$$

(wo: $V_v = v_0 + v_1 + \dots + v_v$),

welche für $\lim n = \infty$ den folgenden Konvergenzsatz liefert: „Ist $\sum (u_v - u_{v+1})$ absolut und $\sum v_v$ überhaupt konvergent, so konvergiert $\sum u_v v_v$ zum mindesten in der vorgeschriebenen Anordnung. Dies gilt auch, wenn $\sum v_v$ innerhalb endlicher Grenzen oscilliert, sofern noch $\lim u_v = 0$ ist.“ Die Anwendung der *Abel'schen* Transformation für derartige Konvergenzbetrachtungen rührt von *Dirichlet* her²²⁰⁾, der obige Satz in etwas speziellerer Fassung von *Dedekind*²²¹⁾; die hier

217) Näheres a. a. O. p. 496 ff.

218) Bull. d. Sc. (2) 14 (1890), p. 97.

219) J. f. Math. 1 (1826), p. 314. Oeuvres 1, p. 222.

220) Vorl. über Zahlentheorie, herausgeg. von R. Dedekind, 3. Aufl. (1879),

gegebene findet sich nebst einigen einfachen Modifikationen bei *Du Bois-Reymond*²²²).

Aus diesem Satze folgt z. B. unmittelbar die zuerst von *Malmsten*²²³) anderweitig bewiesene Konvergenz von $\sum a_v \cdot \cos vx$ (excl. $x = \pm 2k\pi$) und $\sum a_v \cdot \sin vx$, wenn die a_v *monoton* der Null zustreben²²⁴), sowie diejenige einiger anderer trigonometrischer Reihen²²⁵). Auch lässt sich unter gewissen vereinfachenden Voraussetzungen der Konvergenzbeweis für die *Fourier'sche* Reihe auf ihn zurückführen²²⁶).

Die *Abel'sche* Transformation in Verbindung mit der in Nr. 26 hervorgehobenen Konvergenz der Reihe $\sum \frac{M_{v+1} - M_v}{M_{v+1} \cdot M_v^q}$ ist von mir benützt worden²²⁷), um ein sehr allgemeines Kriterium für die Beurteilung der sog. *Dirichlet'schen* Reihen: $\sum k_v \cdot M_v^{-q}$ (k_v beliebig, $q > 0$) zu gewinnen. Spezielle Fälle desselben sind bereits früher von *Dedekind*²²⁸) und *O. Hölder*²²⁹) auf anderen Wegen gefunden worden.

Eine nützliche Verallgemeinerung des gewöhnlichen Konvergenzsatzes über alternierende Reihen ergibt sich aus den *Weierstrass'schen* Konvergenzuntersuchungen²³⁰). Darnach konvergiert $\sum (-1)^v \cdot a_v$ noch *bedingt*, wenn $\frac{a_v}{a_{v+1}} = 1 + \frac{\kappa}{v} + \frac{\lambda}{v^2} + \dots$ und $0 < \kappa \leq 1$.²³¹)

Die wichtigste Kategorie von Reihen, welche generell nur *bedingt* zu konvergieren brauchen, bilden die *Fourier'schen Reihen*²³²). Die allgemeinen Untersuchungen über ihre Konvergenz und Divergenz be-

222) Antr.-Programm, p. 10.

223) Mit der unnötigen Einschränkung $\lim \frac{a_{v+1}}{a_v} = 1$. Nova acta Upsal. 12 (1844), p. 255. Ohne jene Einschr. und einfacher: *Hj. Holmgren*, J. de Math. 16 (1851), p. 186.

224) *G. Björkling* (J. de Math. 17 (1852), p. 470) hält fälschlicher Weise die Bedingungen: $a_v > 0$, $\lim a_v = 0$ schon für ausreichend.

225) *Du Bois-Reymond* a. a. O. p. 12. 17.

226) Desgl. p. 13.

227) Math. Ann. 37 (1886), p. 41.

228) Vorl. über Zahlentheorie, Suppl. 9, § 144.

229) Math. Ann. 20 (1882), p. 545.

230) J. f. Math. 51 (1856), p. 29; Werke 1, p. 185.

231) Dies gilt auch für *komplexe* a_v , falls der reelle Teil von κ der im Text angegebenen Bedingung genügt. — Für $\kappa > 1$ konvergiert $\sum a_v$ *absolut* (am einfachsten nach dem *Raabe'schen* Kriterium), für $\kappa \leq 0$ *divergiert* sie. — Vgl. auch *Stolz*, Allg. Arithm. 1, p. 268.

ruhen auf der Darstellung von s_n durch ein bestimmtes Integral und dessen Discussion für $\lim n = \infty$.

34. Addition und Multiplikation unendlicher Reihen. Für die *Addition* bzw. *Subtraktion* zweier konvergenter Reihen ergibt sich unmittelbar aus der Beziehung: $\lim a_v \pm \lim b_v = \lim (a_v \pm b_v)$ (Nr. 17, Gl. (15)) die Regel:

$$(38) \quad \sum_0^{\infty} u_v \pm \sum_0^{\infty} v_v = \sum_0^{\infty} (u_v \pm v_v).$$

Für die *Multiplikation* hat *Cauchy* den Satz aufgestellt:

$$(39) \quad \left(\sum_0^{\infty} u_v \right) \cdot \left(\sum_0^{\infty} v_v \right) = \sum_0^{\infty} w_v \quad (w_v = u_0 v_v + u_1 v_{v-1} + \dots + u_v u_0),$$

unter der Voraussetzung, dass $\sum u_v$, $\sum v_v$ *absolut konvergieren*²³³), und mit dem ausdrücklichen Hinweise, dass die Formel für *nicht-absolut* konvergierende Reihen *versagen* kann²³⁴). *Abel* hat gezeigt, dass dieselbe *gültig* ist, sobald (ausser den selbstverständlich als *konvergent* vorausgesetzten Reihen $\sum u_v$, $\sum v_v$) die Reihe $\sum w_v$ überhaupt *konvergiert*²³⁵). Da dieser Konvergenzbeweis (abgesehen von dem durch *Cauchy* erledigten Falle der *absoluten* Konvergenz von $\sum u_v$, $\sum v_v$) jedesmal besonders erbracht werden muss, so erscheint es keineswegs überflüssig, dass *F. Mertens* die Gültigkeit des Multiplikationstheorems (39) auf den Fall ausgedehnt hat, dass nur *eine* der beiden Reihen $\sum u_v$, $\sum v_v$ *absolut konvergiert*²³⁶). Der Fall, dass *beide* Reihen nur *bedingt* konvergieren, ist von mir des näheren betrachtet worden²³⁷). Besitzt die eine der beiden Reihen, etwa $\sum u_v$, die Eigenschaft, dass $\sum |u_v + u_{v+1}|$ konvergiert, so erscheint die Bedingung $\lim w_v = 0$ als *notwendig und hinreichend* für die Gültigkeit der Formel (39); daraus ergeben sich insbesondere einfache Kriterien für den Fall

233) Anal. algébr. p. 147.

234) Ebenda p. 149 — wohl die erste Stelle, an welcher das *verschiedene* Verhalten *absolut* und *nicht-absolut* konvergierender Reihen hervorgehoben wird.

235) J. f. Math. 1 (1826), p. 318. (Oeuvres 1, p. 226.) *Abel's* Beweis beruht auf der Betrachtung der Reihen $\sum u_v x^v$, $\sum v_v x^v$ für $\lim x = 1$, also auf einem *stetigen* Grenzübergange. Einen Beweis *ohne* Benützung dieses der Funktionenlehre angehörigen Hilfsmittels hat *E. Cesaro* gegeben: Bull. d. Sc. (2) 14 (1890), p. 114. — Ähnlich *Jordan*, Cours d'Anal. 1, p. 282.

236) J. f. Math. 79 (1875), p. 182. Anderer Beweis von *H. F. Jensen* Nouv.

zweier *alternierender* Reihen mit *monotonen* Gliedern²³⁸). Unter der allgemeineren Annahme, dass $\sum u_v$ *absolut* konvergent wird, wenn man die u_v in Gruppen von p_v Gliedern (p_v constant oder veränderlich, aber endlich bleibend) zusammenfasst, habe ich eine *hinreichende* Bedingung angegeben, welche den *Cauchy'schen* und *Mertens'schen* Satz als speziellen Fall umfasst. Für den Fall $p_v = 2$ hat sodann *A. Voss*²³⁹), für beliebige *constante*²⁴⁰) und *endlich-veränderliche*²⁴¹) p_v *F. Cajori* die *notwendigen und hinreichenden* Bedingungen aufgestellt.

35. Doppelreihen. Die Additionsformel (38) ist zwar ohne weiteres auf eine beliebige *endliche* Anzahl von Reihen:

$$\sum_0^\infty u_v^{(\mu)} \quad (\mu = 0, 1, \dots m),$$

aber nicht auf den Fall $m = \infty$ übertragbar, d. h. für die Gültigkeit der Beziehung:

$$(40) \quad \sum_0^\infty \left(\sum_0^\infty u_v^{(\mu)} \right) = \sum_0^\infty \left(\sum_0^\infty u_v^{(\mu)} \right)$$

erscheint es keineswegs als *hinreichend*, dass die *linke* Seite einen bestimmten Sinn hat, also *schlechthin konvergiert*. *Cauchy* hat gezeigt,

dass Gl. (40) gilt, wenn auch $\sum_0^\infty \left(\sum_0^\infty |u_v^{(\mu)}| \right)$ konvergiert²⁴²); das

Multiplikationstheorem (39) für zwei *absolut* konvergente Reihen erweist sich als spezieller Fall dieses Satzes²⁴³). Zugleich hat *Cauchy* an die Betrachtung eines *zweifach-unendlichen Schemas* von Termen $u_v^{(\mu)}$ (wobei etwa der Index μ die *Zeilen*, der Index v die *Kolonnen* charakterisieren mag) den Begriff der *Doppelreihe* geknüpft. Setzt man

$\sum_0^m \sum_0^n u_v^{(\mu)} = s_n^{(m)}$, so heisst die aus den Gliedern $u_v^{(\mu)}$ gebildete

Doppelreihe $\sum_0^\infty \sum_0^\infty u_v^{(\mu)}$ konvergent und s ihre *Summe*, wenn in dem

238) Eine Anwendung auf die Multiplikation zweier *trigonometrischen* Reihen s. Math. Ann. 26 (1886), p. 157.

239) Math. Ann. 24 (1884), p. 42.

240) Am. J. of Math. 15 (1893), p. 339.

241) N. Y. Bull. (2), 1 (1895), p. 180. — *Cajori* giebt eine kurze Analyse der von mir und *Voss* gefundenen Resultate: N. Y. Bull. 1 (1892), p. 184.

242) Anal. algèbr. p. 541. — Eine allgemeinere, für *Potenzreihen* geltende Form einer hinreichenden Bedingung, die von *Weierstrass* herrührt (Werke 2, p. 205), ist wesentlich *funktionentheoretischer* Natur. Vgl. II B 1.

Nr. 20 dieses Artikels angegebenen Sinne: $\lim_{m,n=\infty} s_n^{(m)} = s$ ist²⁴⁴); (in jedem

anderen Falle heisst sie *divergent* und zwar *eigentlich* divergent, wenn:

$\lim_{m,n=\infty} s_n^{(m)} = +\infty$ bzw. $-\infty$). Auf Grundlage dieser Definition ist

die Lehre von den Doppelreihen späterhin von *Stolz*²⁴⁵) und neuerdings von mir²⁴⁶) ausführlicher behandelt worden. *Stolz* hebt vor allem mit Recht hervor, dass jene Konvergenzdefinition in keiner Weise die *Konvergenz* irgend einer einzelnen *Zeile* oder *Kolonne* involviere; es braucht nicht einmal für irgend einen einzigen bestimmten Wert μ (bzw. ν): $\lim_{\nu=\infty} u_\nu^{(\mu)} = 0$ (bzw. $\lim_{\mu=\infty} u_\nu^{(\mu)} = 0$) zu sein, während allerdings bei einer konvergenten Doppelreihe stets: $\lim_{\mu,\nu=\infty} u_\nu^{(\mu)} = 0$

sein muss. Ebenso wenig kann aus der Konvergenz der einzelnen Zeilen (Kolonnen) und der von ihren Summen gebildeten Reihe, ja nicht einmal aus der Existenz der Gleichung (40)²⁴⁷) die *Konvergenz der Doppelreihe* gefolgert werden. Dagegen gilt der Satz: „Konvergiert ausser der Doppelreihe auch jede einzelne Zeile (Kolonne), so hat man:

$$\sum_0^\infty \sum_\nu u_\nu^{(\mu)} = \sum_0^\infty \sum_\mu u_\nu^{(\mu)} \quad (\text{bzw.} = \sum_0^\infty \sum_\mu u_\nu^{(\mu)}).“$$

Man kann die Terme einer Doppelreihe auch als einfach-unendliche Reihe $\sum_0^\infty w_\nu$ ordnen, am bequemsten nach „*Diagonalen*“, d. h. wenn man setzt: $w_\nu = u_0^{(\nu)} + u_1^{(\nu-1)} + \dots + u_\nu^{(0)}$. Ist dann $\sum_0^\infty \sum_\mu u_\nu^{(\mu)} = s$

244) Dies *scheint* wenigstens der Sinn der ihrem Wortlaute nach nicht ganz klaren *Cauchy'schen* Definition (a. a. O. p. 538). Freilich ist alsdann die von *Cauchy* daraus gezogene Folgerung, dass jede *Zeile* und jede *Kolonne* eine *konvergente* Reihe bilde, *unrichtig*. *Cauchy* dürfte dies später selbst bemerkt haben, da er in den *Résum. anal.* p. 56 eine *andere* Definition zu Grunde legt; dieselbe erscheint mir jedoch teils zu eng (da sie in Wahrheit nur den Fall der *unbedingten* Konvergenz umfasst), teils zu kompliziert und wenig prägnant (wegen der grossen Unbestimmtheit des a. a. O. mit s_n bezeichneten Ausdrucks).

245) *Math. Ann.* 24 (1884), p. 157 ff.

246) *Münch. Ber.* 27 (1897), p. 101 ff.

247) Auch wenn $\sum_0^\infty \sum_\nu u_\nu^{(\mu)}$, $\sum_\nu \sum_0^\infty u_\nu^{(\mu)}$ beide konvergieren, brauchen sie *nicht* einander *gleich* zu sein. (Vgl. *F. Arndt*, *Arch. f. Math.* 11 [1848], p. 319. *Pringsheim* a. a. O. p. 119.) In diesem Falle ist die betreffende *Doppelreihe* allemal *divergent*.

und $u_v^{(\mu)} \geq 0$, so hat man allemal auch $\sum_0^\infty w_v = s$. Sind die $u_v^{(\mu)}$ beliebig, aber so beschaffen, dass die einzelnen Zeilen und Kolonnen konvergieren oder innerhalb *endlicher* Grenzen oscillieren, so kann $\sum w_v$ nur *oscillieren* oder *konvergieren*, und im letzteren Falle ist wiederum $\sum_0^\infty w_v = s$.²⁴⁸⁾

Konvergiert die Doppelreihe $\sum_{\mu, v} |u_v^{(\mu)}|$, so konvergiert auch stets $\sum_{\mu, v} u_v^{(\mu)}$ und heisst dann wiederum *absolut* konvergent. Zugleich konvergiert jede Zeile (Kolonne), und es konvergiert die Reihe der Zeilen- (Kolonnen-) Summen, desgleichen diejenigen der Diagonalen. Dieses Resultat lässt sich noch folgendermassen verallgemeinern: „Von den vier Gleichungen

$$(41) \quad \sum_0^\infty \sum_{\mu, v} u_v^{(\mu)} = s, \quad \sum_0^\infty \sum_{\mu} \sum_{\nu} u_v^{(\mu)} = s, \quad \sum_0^\infty \sum_{\nu} \sum_{\mu} u_v^{(\mu)} = s, \quad \sum_0^\infty w_v = s$$

zieht *jede* die drei anderen nach sich, wenn die betreffende Reihe bei Vertauschung der $u_v^{(\mu)}$ mit $|u_v^{(\mu)}|$ konvergent bleibt“²⁴⁹⁾.

Jede *absolut* konvergente Doppelreihe ist auch *unbedingt* konvergent — *vice versa*²⁵⁰⁾.

Für die Feststellung der *absoluten* Konvergenz lassen sich analog wie bei den einfachen Reihen mit Hülfe des Prinzipes der Reihenvergleichung allgemeine Kriterien aufstellen. Als wesentlich ist hierbei hervorzuheben, dass für die *Divergenz* der Doppelreihe $\sum_{\mu, v} a_v^{(\mu)}$ (wo: $a_v^{(\mu)} \geq 0$) schon die *Divergenz einer einzigen Zeile* (Kolonne) *ausreicht*, aber *keineswegs notwendig* ist, während umgekehrt für die *Konvergenz* der Doppelreihe die *Konvergenz aller möglichen Zeilen* (Kolonnen) *notwendig* ist, aber *nicht ausreicht*. Infolgedessen erscheint es zweckmässig, die *Konvergenz-* und *Divergenzkriterien wesentlich von*

248) Münch. Ber. a. a. O. p. 124. — Sind unter den Zeilen oder Kolonnen der *konvergenten* Doppelreihe solche, deren Summen *nicht endlich* bleiben, so kann $\sum w_v$ gegen einen von s *verschiedenen* Wert konvergieren oder *eigentlich* divergieren. (A. a. O. p. 130.)

249) A. a. O. p. 133. — In diesem Satze ist der zu Anfang erwähnte *Cauchy'sche* als Teil enthalten.

250) A. a. O. p. 138. — Beispiele *bedingt* konvergierender Doppelreihen s. Stolz a. a. O. p. 161. — Die von *Eisenstein* (J. f. Math. 35 (1847), p. 172 ff.) behandelten „*Doppelreihen*“ fallen überhaupt nicht unter den hier gegebenen *Konvergenz-*Begriff, sie können nur in einem *erweiterten* Sinne *bedingt konvergent*

einander verschieden zu formulieren und auch die erforderlichen *Vergleichsreihen* entsprechend verschieden auszuwählen. Von diesem Gesichtspunkte ausgehend habe ich die folgenden allgemeinen Kriterien aufgestellt ²⁵¹⁾:

$$(42) \left\{ \begin{array}{l} \text{Konvergenz, wenn:} \\ \lim_{\mu=\infty} C_{\mu} \cdot a_{\nu}^{(\mu)} < \infty, \quad \lim_{\nu=\infty} C_{\nu} \cdot a_{\mu}^{(\nu)} < \infty, \quad \lim_{\mu, \nu=\infty} C_{\mu} \cdot C_{\nu} \cdot a_{\nu}^{(\mu)} < \infty, \\ \text{Divergenz, wenn:} \quad \lim_{\mu, \nu=\infty} (\mu + \nu) \cdot D_{\mu+\nu} a_{\nu}^{(\mu)} > 0. \end{array} \right. \quad (252)$$

36. Vielfache Reihen. Die oben für Doppelreihen aufgestellte Konvergenzdefinition lässt sich ohne weiteres auf *beliebig-vielfache* Reihen übertragen ²⁵³⁾. Dass eine solche allemal *überhaupt* und zwar *unbedingt* konvergiert, wenn die entsprechende Reihe der absoluten Beträge konvergiert, ist wiederum schon von *Cauchy* hervorgehoben worden ²⁵⁴⁾. Für einen speziellen Typus von *p*-fachen Reihen, nämlich: $\sum (\nu_1^2 + \nu_2^2 + \dots + \nu_p^2)^{-\sigma}$ (ν_1, ν_2, \dots ganze Zahlen) hat *Eisenstein* die *Konvergenz* erwiesen, falls $\sigma > \frac{p}{2}$, und daraus die Konvergenz einer wesentlich allgemeineren Gattung erschlossen ²⁵⁵⁾. Behufs Untersuchung der *p*-fachen Thetareihen ²⁵⁶⁾ hat *Riemann* durch einfache Umformung des in Nr. 23 erwähnten *Cauchy'schen* Satzes über den Zusammenhang von $\sum_m^{\infty} f(\nu)$ und $\int_m^{\infty} f(x) dx$ ein zur Beurteilung einfacher, wie beliebig-vielfacher Reihen brauchbares Konvergenzkriterium gewonnen ²⁵⁷⁾. *A. Hurwitz* hat dasselbe neuerdings mit einem durchsichtigeren Beweise versehen, durch ein entsprechendes Divergenzkriterium ergänzt und auf *p*-fache Reihen von sehr allgemeinem Charakter angewendet, welche die *Eisenstein'schen* Reihen und *p*-fachen Thetareihen als spezielle Fälle enthalten ²⁵⁸⁾.

251) A. a. O. p. 146. 150.

252) Diese Kriterien lassen sich wiederum durch passende Wahl der C_{ν} , D_{ν} (vgl. Nr. 26) beliebig verschärfen. — Einige Kriterien von geringerer Tragweite, darunter auch ein solches 2ter Art, welches dem *Cauchy'schen* Fundamental-kriterium entspricht, hat *O. Biermann* angegeben: Monatsh. f. Math. u. Phys. 8 (1896), p. 121 ff.

253) Eine *engere* Definition wiederum bei *Cauchy*, Résumé. anal. p. 56. — Vgl. Nr. 35, Fussn. 9.

254) Par. C. R. 19 (1844), p. 1434.

255) J. f. Math. 35 (1847), p. 157 ff.

256) Vgl. II B 7.

257) Ges. W. (1876), p. 452.

258) Math. Ann. 44 (1893), p. 142.

37. Transformation von Reihen. Wie wenig sich auch die Analysten des vorigen Jahrhunderts um die Frage nach der Konvergenz der Reihen kümmerten, so haben sie sich doch vielfach mit der *Transformation* konvergierender Reihen in *schneller* konvergierende beschäftigt²⁵⁹). Als *arithmetisch-elementare* hierher gehörige Methoden sind diejenigen von *J. Stirling*²⁶⁰) und *Euler*²⁶¹) zu nennen. Beide beruhen im Grunde auf dem gleichen Prinzip, nämlich auf der Umwandlung der einzelnen Reihenglieder in unendliche Reihen und der Summation des aus jenen Reihen als *Zeilen* zu bildenden zweifach-unendlichen Schemas nach *Kolonnen*. *Euler* gelangt so zu der Transformationsformel:

$$(43) \quad \sum_0^{\infty} a_v x^v = a_0 + a_1 \frac{x}{1-x} + \Delta a_1 \left(\frac{x}{1-x} \right)^2 + \dots \\ + \Delta^v a_1 \left(\frac{x}{1-x} \right)^{v+1} + \dots$$

(wo: $\Delta a_1 = a_2 - a_1$, $\Delta^2 a_1 = \Delta a_2 - \Delta a_1$, u. s. f.), welche für $x = -1$ die zur Berechnung gewisser numerischer Reihen nützliche Form annimmt:

$$(44) \quad \sum_0^{\infty} (-1)^v \cdot a_v = a_0 - \frac{1}{2} a_1 + \frac{1}{2^2} \Delta a_1 - \dots \\ + (-1)^{v+1} \cdot \frac{1}{2^{v+1}} \Delta^v a_1 + \dots$$

Die bei *Euler* selbstverständlich fehlende *Konvergenz*-Untersuchung ist später von *J. V. Poncelet* durch Aufstellung des die Entwicklungen (43), (44) vervollständigenden *Restgliedes* nachgeholt worden²⁶²).

Die Anwendbarkeit der *Euler*'schen Transformation ist eine verhältnismässig beschränkte. Grössere Allgemeinheit besitzt eine von *Kummer* herrührende Methode²⁶³), welche zugleich gestattet, durch

259) Über die sog. Transformation von *divergenten* Reihen in *konvergente* vgl. Nr. 40 Fussn. 6.

260) Methodus differentialis sive tractatus de summatione et interpolatione serierum infinitarum. Lond. 1730, p. 6. — Näheres über *Stirling's* Methode s. *Klügel* 5, Art. „Umformung der Reihen“, p. 350 ff. — Ein Beispiel derselben giebt auch *Bertrand*, Calc. diff. p. 260.

261) Instit. calc. different. 1755, p. 281.

262) J. f. Math. 13 (1835), p. 1 ff. — Die bemerkenswertesten, übrigens auch schon von *Euler* (a. a. O. p. 294) angeführten, von *Poncelet* genauer diskutierten (a. a. O. p. 17–20) Beispiele für die Anwendung der Formel (44) sind:

$$\lg 2 = \sum_1^{\infty} (-1)^{v-1} \cdot \frac{1}{v} = \sum_1^{\infty} \frac{1}{v \cdot 2^v}, \\ \frac{\pi}{4} = \sum_0^{\infty} (-1)^v \cdot \frac{1}{2v+1} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sum_1^{\infty} \frac{1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot v}{3 \cdot 5 \cdot \dots \cdot (2v+1)}.$$

iterierte Anwendung die *Konvergenz* der betreffenden Reihe immer weiter zu *verstärken*. Dieselbe bezieht sich zunächst auf Reihen mit lauter *positiven* Gliedern und knüpft unmittelbar an den beim *Kummer*-schen Konvergenzkriterium (Nr. 24, (18)) auftretenden Ausdruck an:

$$(45) \quad P_v \cdot \frac{a_v}{a_{v+1}} - P_{v+1} = \lambda_v,$$

aus welchem ja für: $\lim \lambda_v = \lambda > 0$ die *Konvergenz* von $\sum a_v$ resultierte. Aus (45) folgt nämlich:

$$(46) \quad \sum_1^{\infty} a_v = \frac{1}{\lambda} (P_0 a_0 - \lim_{n \rightarrow \infty} P_n a_n) + \sum_1^{\infty} \left(1 - \frac{\lambda_{v-1}}{\lambda}\right) \cdot a_v,$$

wobei die rechts auftretende Reihe wegen $\lim (\lambda - \lambda_{v-1}) = 0$ wesentlich *stärker* konvergiert, als $\sum a_v$.²⁶⁴⁾ *Leclert* hat in einer von *E. Catalan* publizierten²⁶⁵⁾ Mitteilung gezeigt, dass die Formel (46) ebenfalls auf Reihen mit *positiven* und *negativen* Gliedern, insbesondere auch nur *bedingt* konvergierende anwendbar ist²⁶⁶⁾ und hat noch eine zweite, der obigen verwandte Transformationsformel angegeben.

In neuester Zeit hat sich *A. Markoff* mehrfach mit Reihentransformation beschäftigt²⁶⁷⁾ und ist zu einer allgemeinen Transformationsformel gelangt²⁶⁸⁾, welche, wiederum auf der Umformung der gegebenen Reihe in eine *zweifach-unendliche* beruhend, eine erhebliche Verallgemeinerung der von *Stirling* und *Euler* entwickelten Methoden darstellt und diese letzteren als spezielle Fälle umfasst.

38. Euler-Mac Laurin'sche Summenformel. Halbkonvergente Reihen. Von durchgreifenderer Bedeutung als die genannten *rein elementaren* Transformationen ist die als *Euler-Mac Laurin'sche Summenformel* bekannte Beziehung:

264) Bei *Kummer* werden die P_v noch der Beschränkung unterworfen, dass $\lim P_n a_n = 0$; dieselbe ist indessen unnötig, vgl. Nr. 24, Fussn. 1.

265) Mém. Belg. cour. et sav. étr. 33 (1865). -- Vgl. auch: *G. Darboux*, Bullet. d. Sc. (2), 1 (1877), p. 356.

266) Durch dreimalige Anwendung der Formel (46) auf die überaus langsam konvergierende *Leibniz'sche* Reihe $\frac{\pi}{4} = \sum_v (-1)^{v-1} \frac{1}{2v-1}$ ergibt sich z. B.:

$$\frac{\pi}{4} = \frac{4}{3} + 24 \sum_1^{\infty} \frac{(-1)^{v-1}}{(4v^2-1)^2(4v^2-9)^2};$$

eine Reihe, welche so *stark* konvergiert, dass die Summation von *nur vier* Gliedern schon π auf 4 Dezimalstellen richtig liefert.

267) S. z. B. Par. C. R. 109 (1889), p. 934.

268) Pétersb. Mém. (7), 37 (1890). Auch: Differenzenrechnung, deutsch von

$$(47) \quad h \cdot \sum_0^{p-1} f(a + \nu h) = \int_a^{a+ph} f(x) dx - \frac{h}{2} \{f(a+ph) - f(a)\} \\ + \sum_1^n (-1)^{\nu-1} \cdot \frac{B_{2\nu-1} \cdot h^{2\nu}}{(2\nu)!} \{f^{2\nu-1}(a+ph) - f^{2\nu-1}(a)\} + R_{2n+1}$$

(wo R_{2n+1} ein *Restglied* bedeutet, dem man verschiedene Formen geben kann). Dieselbe gehört indessen nach Form und Herleitung der *Integralrechnung* an²⁶⁹⁾ und findet hier nur Erwähnung, weil sich daran die Entstehung des allgemeinen Begriffs der sogenannten *Halbkonvergenz* von Reihen knüpft. Wenn in der für jedes n geltenden Gl. (47): $\lim_{n=\infty} R_{2n+1} = 0$ wird, so geht die rechte Seite für $\lim n = \infty$

in eine *konvergente* Reihenentwicklung über, deren Summe genau mit dem Werte der linken Seite übereinstimmt. Dies ist aber in der Regel *nicht* der Fall. Dagegen besitzt R_{2n+1} die Eigenschaft, mit wachsenden Werten von n *zunächst* abzunehmen und für einen gewissen Wert $n = N$ einen *verhältnismässig sehr kleinen* Minimalwert zu erlangen, so dass also die Reihe \sum_1^n bei wachsendem $n \leq N$ den

Wert der linken Seite mit *wachsender*, für $n = N$ mit *relativ grosser*, bei weiterer Vergrösserung von n nur zu *verringender* Annäherung darstellt. Solche Reihen heissen dann nach dem Vorgange von *Legendre*²⁷⁰⁾ *halbkonvergent*. *Halbkonvergente* Reihenentwicklungen sind also *divergente* Reihen von der Beschaffenheit, dass die Summe einer *passenden endlichen* Anzahl von Gliedern einen gegebenen arithmetischen Ausdruck mit *verhältnismässig grosser* (aber immerhin durch den Charakter der Reihe *definitiv begrenzter, nicht*, wie bei einer *konvergenten* Reihe mit *beliebig* grosser) Annäherung darstellt²⁷¹⁾. Die für die Analysis wichtigsten halbkonvergenten Reihen entspringen der Formel (47), z. B. die als *Stirling'sche* Formel²⁷²⁾ bekannte Darstel-

269) Näheres darüber s. II A 2 u. 3; auch I E.

270) Vgl. Nr. 31, Fussn. 5. Die Erscheinung der Halbkonvergenz wurde zuerst von *Euler* bemerkt; s. *Reiff* p. 100.

271) Für wirkliche numerische Berechnung erweist sich diese nur „*verhältnismässig*“ grosse Annäherung häufig wertvoller, als die *theoretisch* zwar „*beliebig*“ gross zu machende, in der *Praxis* aber im Verhältnis zu der aufzuwendenden Rechnung oft *geringe* Annäherung, welche durch Summation eines *konvergenten* s_n erzielt wird.

272) Dieselbe wurde schon vor Auffindung der allgemeinen Formel (47), aus welcher sie für $f(x) = \log x$ hervorgeht, im wesentlichen von *Stirling* angegeben.

lung von $\sum_0^{p-1} \lg(x + v h)$. Einen andern Typus, der sich unmittelbar durch fortgesetzte partielle Integration ergibt, hat *Laplace* gelegentlich der angenäherten Darstellung des für die Wahrscheinlichkeitsrechnung fundamentalen Integrals $\int_0^x e^{-x^2} \cdot dx$ hervorgehoben²⁷³⁾

und auch darauf hingewiesen, dass die gewöhnliche *Taylor'sche* Formel möglicherweise zu *halbkonvergenten* Entwicklungen führen kann²⁷⁴⁾. *Cauchy* hat in ganz *elementarer* Weise gezeigt²⁷⁵⁾, dass gewisse *divergente* Potenzreihen allemal zu den *halbkonvergenten* gehören, und einige auf Grund dieser Bemerkung ohne weiteres als *halbkonvergent* charakterisierte Entwicklungen abgeleitet, welche sonst durch die Formel (47) oder andere transscendente Hilfsmittel gewonnen zu werden pflegen²⁷⁶⁾.

Gewisse halbkonvergente Reihen (z. B. die oben erwähnte *Stirling'sche*) haben die Eigenschaft, dass die *Annäherung* zwischen der darzustellenden *Funktion* $F(x)$ und der *Summe* $S_n(x)$ einer endlichen Gliederzahl mit *wachsendem* x in dem Grade *zunimmt*, dass

$$\lim_{x=\infty} x^n \cdot (F(x) - S_n(x)) = 0.$$

Man sagt alsdann, $S_n(x)$ liefere eine *asymptotische* Darstellung von $F(x)$. *H. Poincaré* bezeichnet deshalb solche Reihen schlechthin als *asymptotische* und hat verschiedene allgemeine Typen dieser Art an-

teils den speziellen Fall: $\sum_1^x \lg v$, teils aber auch den *allgemeineren* (von *Stirling* noch keineswegs behandelten): $\lg \Gamma(x+1)$, welcher für $x = p$ in den obigen Spezialfall übergeht. — Vgl. auch II A 3.

273) Théorie anal. des probab. Livre I, Art. 27. (Oeuvres 7, p. 104.) Derselben Methode entspringt die von *Ch. Hermite* angegebene halbkonvergente Entwicklung von $\int_{-\infty}^x \Phi(x) \cdot e^{nx} \cdot dx$ (Tor. Atti 14 [1879], p. 107, desgl. die von *Edm. Laguerre* zum Ausgangspunkte einer konvergenten Kettenbruchentwicklung benützte von $\int_x^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx$ (Bull. S. M. d. F. T. 7 [1879], p. 72.

274) A. a. O. Art. 44, p. 179.

275) Par. C. R. 17 (1843), p. 372.

276) Weitere Untersuchungen über halbkonv. Reihen, insbesondere über zweckmässige Wahl von n , bei *T. J. Stieltjes*: Recherches sur quelques séries semi-conv. Thèse, Paris 1886.

gegeben²⁷⁷⁾²⁷⁸⁾. Auch hat er gezeigt, dass man auf dieselben gewisse Rechnungsoperationen (z. B. Multiplikation, Integration, dagegen *nicht* Differentiation) ganz wie bei *konvergenten* Reihen anwenden kann²⁷⁷⁾.

39. Divergente Reihen. Dass eine *divergente* Reihe *nicht* nach Art einer *konvergenten* eine *bestimmte Zahl* vorstellt, folgt schon unmittelbar aus ihrer Definition. Nichtsdestoweniger bleibt zunächst die Frage offen, ob es zweckmässig und ohne Widersprüche durchführbar erscheint, einer *divergenten* Reihe eine *bestimmte Zahl als Summe zuzuordnen*, und ob (bezw. in wie weit) eine Verwendung *divergenter* Reihen als *formales Darstellungs- und Beweismittel* für zulässig gelten kann. In der Periode bis zu *Cauchy* und *Abel* ist diese Frage von der übergrossen Mehrzahl der bedeutendsten Mathematiker fast rückhaltslos bejaht worden²⁷⁹⁾. Namentlich hat *Euler* in einer grossen Reihe von Arbeiten *divergente* Reihen prinzipiell als völlig gleichberechtigt mit *konvergenten* benützt. Als *Summe* einer *divergenten* Reihe betrachtet er den endlichen Zahlenwert des *arithmetischen Ausdruckes*, durch dessen *Entwicklung* die Reihe entstanden ist²⁸⁰⁾. Also: Besteht für irgend welche Werte von x die *konvergente* Entwicklung:

$$(I) \quad F(x) = \sum_0^{\infty} f_v(x),$$

so setzt er auch:

$$(II) \quad \sum_0^{\infty} f_v(\alpha) = F(\alpha),$$

277) Acta math. 8 (1886), p. 295 ff.

278) Méth. nouvelles de la mécanique céleste 2 (Paris 1893), p. 2.

279) Gegen die Benützung *divergenter* Reihen erklärten sich: *Pierre Varignon* (Reiff p. 68), *Nic. Bernoulli* (ibid. p. 121) und mit vollkommener Klarheit *Jean Le-ron d'Alembert* (p. 135): „Pour moi j'avoue que tous les raisonnements fondés sur les séries qui ne sont pas convergentes . . . me paraîtront très suspects, même quand les résultats s'accorderaient avec des vérités connues d'ailleurs“ (Opusc. math. 5, 1768, p. 183). — Am schärfsten hat sich wohl *Abel* in ähnlichem Sinne ausgesprochen: „Les séries divergentes sont en général quelque chose de bien fatal, et c'est une honte qu'on ose y fonder aucune démonstration“ (Brief an Holmboe vom 16. Januar 1826; Oeuvres 2, p. 256). Doch will er allenfalls *divergente* Reihen als *symbolische Ausdrücke* zur abgekürzten Darstellung mancher Sätze gelten lassen. (In der gleichfalls von 1826 stammenden Abhandlung über die binomische Reihe: Oeuvres 1, p. 220.) — *Cauchy* versteht in dem Fussn. 275 citierten Aufsätze unter der „legitimen Anwendung *divergenter* Reihen“ lediglich die Benützung als *halbkonvergent* erkannter Reihen zur angenäherten Berechnung. In einer anderen Arbeit (Par. C. R. 20, 1845, p. 329) handelt es sich um *divergente Doppelreihen*, die immerhin in *bestimmten Anordnungen* noch *konvergieren*, also um einen besonderen Fall von *bedingter* Konvergenz (ähnlich wie bei den *Eisenstein'schen* Reihen, Nr. 35, Fussn. 250).

280) Inst. calc. diff. Pars II, Cap. I, 9 (p. 289).

wenn $\sum f_v(\alpha)$ *divergiert* und $F(\alpha)$ eine bestimmte Zahl vorstellt. Dass diese Definition in der von *Euler* ausgesprochenen *Allgemeinheit* auf unlösbare Widersprüche führt und somit in *dieser* Form unhaltbar ist, steht heute ausser Zweifel; weiss man doch, dass Gl. (II) *selbst dann nicht* allemal aus Gl. (I) zu folgen braucht, wenn $\sum f_v(\alpha)$ *konvergiert* — nämlich dann nicht, wenn $\sum f_v(x)$ in der Nähe der Stelle $x = \alpha$ *ungleichmässig*²⁸¹⁾ konvergiert, oder wenn $\sum f_v(x)$ in *verschiedenen Teilen* des Konvergenzgebietes *verschiedene* arithmetische Ausdrücke zur Summe hat. Und zwar kann diese Eventualität, die man zuerst an dem verhältnismässig *komplizierten* (und in diesem Falle wesentlich auf *reelle* x beschränkten) Typus der *Fourier'schen Reihen*²⁸²⁾ beobachtet hat, schon eintreten, wenn die $f_v(x)$ *rationale Funktionen allereinfachster Art* bedeuten²⁸³⁾.

Wenn nun aber $\sum f_v(x)$ für $x = \alpha$ *divergiert*, so liegt zunächst überhaupt kein stichhaltiger Grund vor, gerade den Wert $F(\alpha)$ als *Summe* der Reihe für *jenen einzelnen Wert* $x = \alpha$ anzusehen. Denn es giebt *unendlich viele* Entwicklungen: $\Phi(x) = \sum_0^\infty \varphi_v(x)$, für welche $\varphi_v(\alpha) = f_v(\alpha)$ wird, während die $\Phi(\alpha)$ unter sich und von $F(\alpha)$ *durchaus verschieden* sein können; der Reihe $\sum_0^\infty f_v(\alpha)$ würden dann also in Wahrheit *unendlich viele verschiedene Summen* zukommen. *Beispiel: Euler* folgert aus der für $|x| < 1$ geltenden Beziehung:

$$\frac{1}{1+x} = \sum_0^\infty (-1)^v \cdot x^v, \text{ indem er } x=1 \text{ setzt: } \sum_0^\infty (-1)^v = \frac{1}{2}.^{284)}$$

281) Vgl. II A 1.

282) Vgl. II A 8.

283) Beispiele solcher Reihen sind zuerst von *L. Seidel* (J. f. Math. 73 [1871], S. 297) und *E. Schroeder* (Z. f. Math. 22 [1877], p. 184) angegeben worden. Unabhängig von diesen beiden hat *Weierstrass* die grosse Tragweite der fraglichen Erscheinung für die Funktionentheorie festgestellt: Berl. Ber. 1880, p. 728 ff.; 1881, p. 228 (Werke 2, p. 210. 231). Vgl. auch meine Note: Math. Ann. 22 (1883), p. 109.

284) Novi Comment. Petrop. 5 (ad ann. 1754. 1755), p. 206. — Die Gleichung:

$$\sum_0^\infty (-1)^v = \frac{1}{2} \left(\text{bezw. die damit gleichwertige: } \sum_0^\infty (-1)^v \cdot \frac{l}{m} = \frac{l}{2m} \right) \text{ war}$$

schon von *Jac. Bernoulli* als ein „paradoxon non inelegans“ auf die gleiche Art abgeleitet worden (Pos. de ser. inf. P. III (1696); Opera 2, p. 751) und hatte zu einer umfangreichen Diskussion (*Reiff* p. 65—70) geführt, in deren Verlauf

Man hat aber andererseits für $|x| < 1$ (wenn $[\lambda]$ die grösste in λ enthaltene ganze Zahl bedeutet):

$$(48) \quad \begin{cases} \sum_0^{\infty} (-1)^{\nu} \cdot x^{\left[\frac{\nu}{2}\right]} &= 1 - 1 + x - x + x^2 - x^2 + \dots = 0, \\ \sum_0^{\infty} (-1)^{\nu} \cdot x^{\nu} + (-1)^{\nu} &= x - 1 + x^3 - x^3 + x^5 - x^5 + \dots = -\frac{1}{1+x} \\ &\text{u. s. f.} \end{cases}$$

Da jede dieser Reihen für $x = 1$ gleichfalls die Form $\sum_0^{\infty} (-1)^{\nu}$ annimmt, so könnte man nach *Euler* der letzteren Reihe eben so gut die Summe 0 oder $-\frac{1}{2}$ (oder auch unendlich viele andere Summenwerte) beilegen²⁸⁵). Wenn also *Euler* an jene angeblich zu Recht bestehende Gleichung: $\sum_0^{\infty} (-1)^{\nu} = \frac{1}{2}$ die unzweideutige Bemerkung knüpft²⁸⁶): man könne, wenn man *durch irgendwelche Rechnung* auf die Reihe $\sum_0^{\infty} (-1)^{\nu}$ geführt werde, dieselbe ohne weiteres durch die Zahl $\frac{1}{2}$ ersetzen — so enthält dieselbe eine *prinzipiell irrtümliche*, durch keinerlei analytische Hilfsmittel irgendwie annehmbar zu machende Behauptung, während allerdings der Gleichung $\sum_0^{\infty} (-1)^{\nu} = \frac{1}{2}$

insbesondere *Leibniz* für die Richtigkeit der Gleichung $\sum_0^{\infty} (-1)^{\nu} = \frac{1}{2}$ bedingungslos eintrat und deren wahre Natur mit Hülfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung metaphysisch zu erklären suchte: der Wert $\frac{1}{2}$ erscheine als das *arithmetische Mittel* aus den für $\sum_0^{\infty} (-1)^{\nu}$ mit *vollkommen gleicher Wahrscheinlichkeit* resultierenden Summenwerten 1 und 0. Die Reihe $\sum_0^{\infty} (-1)^{\nu}$ wird seitdem gewöhnlich (auch von *Euler*) schlechthin als die *Leibniz'sche* bezeichnet (neben der Nr. 31 erwähnten Reihe: $\frac{\pi}{4} = \sum_0^{\infty} (-1)^{\nu} \cdot \frac{1}{2\nu+1}$).

285) Der umgekehrte, schon von *Nic. Bernoulli* (*Reiff* p. 122) gemachte Einwurf, dass man für ein und dieselbe Zahl *verschiedene* divergente Entwicklungen finden könne, entbehrt offenbar der nötigen Beweiskraft.

286) L. c., p. 211. — Noch *Fourier* (*Théorie analyt. de la chaleur* 1822) bedient sich ohne Bedenken dieser Substitution (*Oeuvres* 2, p. 206).

als einer durch *eine ganz bestimmte Rechnung* abgeleiteten *cum grano salis* eine ganz vernünftige analytische Bedeutung beigelegt werden

kann, nämlich: $\lim_{x=1} \sum_{v=0}^{\infty} (-1)^v \cdot x^v = \frac{1}{2}$.²⁸⁷⁾

40. Divergente Potenzreihen. Auch wenn man die *Euler'sche* Definition der divergenten Reihensummen nicht im Sinne der eben citierten Bemerkung²⁸⁸⁾, sondern in dem offenbar vorteilhafteren²⁸⁹⁾ Sinne auffasst, dass statt *einzelner numerischer Werte* α allemal ein *zusammenhängendes Divergenzgebiet* von Werten x' in Betracht kommt, so liefert dieselbe kein brauchbares Resultat, falls man nicht die $f_v(x)$ *sehr wesentlichen* Einschränkungen unterwirft; andernfalls kann ja, wie oben bemerkt, $\sum_{v=0}^{\infty} f_v(x)$ in *verschiedenen Teilen* des *Konvergenz-Gebietes* ganz *verschiedene* $F(x)$ vorstellen, sodass hieraus eine *bestimmte* Definition von $\sum_{v=0}^{\infty} f_v(x)$ für das *Divergenz-Gebiet* nicht entnommen werden kann. Als passendste Spezialisierung der $f_v(x)$ erweist sich aber die Annahme: $f_v(x) = a_v x^v$, und thatsächlich hat *Euler* seine obige *viel zu allgemeine* Definition fast ausschliesslich in diesem

287) Die von *Leibniz* hervorgehobene Eigentümlichkeit, dass hierbei gerade das *arithmetische Mittel* aus den Summen $s_n = \sum_{v=0}^n (-1)^v$ zum Vorschein kommt,

haben *Raabe* (J. f. Math. 15 [1836], p. 355) und *Jeppe Prehn* (ibid. 41 [1851], p. 8) in freilich unzulänglicher Weise zu verallgemeinern gesucht. Eine präcise Fassung und Begründung hat diese Verallgemeinerung erst durch *G. Frobenius* (ibid. 89

[1880], p. 262) erhalten, nämlich: „Ist $\sum_{v=0}^n a_v = s_n$, so hat man:

$$\lim_{x=1} \sum_{v=0}^{\infty} a_v x^v = \lim_{n=\infty} \frac{s_0 + s_1 + \dots + s_{n-1}}{n},$$

falls der letztere Grenzwert *existiert*.“ Dieser Satz bildet das Anfangsglied einer ganzen Kette ähnlicher Sätze: *O. Hölder*, Math. Ann. 20 [1882], p. 535 ff.

288) Darnach würde schon jeder einzelnen *numerischen* divergenten Reihe eine *eindeutig bestimmte* Summe zukommen.

289) Hierbei treten nämlich an die Stelle der blossen *Zahlen* $f_v(\alpha)$ gesetzmässig gebildete *analytische Ausdrücke* $f_v(x')$, so dass also auch bei *numerischer Gleichheit* von $f_v(x')$ und $\varphi_v(x')$ für irgend einen bestimmten Wert $x' = \alpha$ die Reihen $\sum f_v(\alpha)$, $\sum \varphi_v(\alpha)$ immer noch als *merklich verschieden* charakterisiert erscheinen und ihnen ohne direkten Widerspruch auch *verschiedene* „Summen“ zugeordnet werden könnten.

sehr speziellen Sinne gebraucht²⁹⁰): und wenn fast alle Endresultate, bei denen ihm rein formale, nach heutigen Begriffen an sich unzulässige Operationen mit *divergenten* Reihen als Durchgangspunkt gedient haben, sich als *richtig* erweisen, so rührt das einfach davon her, dass diese Operationen (sog. Summation, Transformation, Integration) infolge der ganz besonderen Qualitäten der „Potenzreihen“ $\sum a_v x^v$ sich durch Grenzübergänge²⁹¹) oder durch das Prinzip der analytischen Fortsetzung²⁹²) a posteriori rechtfertigen lassen.

Hieraus ergibt sich aber die Berechtigung, die am Anfang von Nr. 39 angedeutete Frage nunmehr in folgender Weise spezieller zu formulieren: In wie weit kann eine Potenzreihe $\sum a_v x^v$ auch dort, wo sie *divergiert*, zur Definition einer bestimmten von x abhängigen Zahl („Funktion“) $F(x)$ dienen? Und dürfen gewisse zunächst nur für *konvergente* Reihen definierte Rechnungsoperationen auf solche *rein formale Äquivalenzen*: $F(x) = \sum a_v x^v$ (welche nur im Falle der *Konvergenz* von $\sum a_v x^v$ den Sinn wirklicher Gleichungen annehmen) ohne Widerspruch angewendet werden?

H. Padé und E. Borel haben neuerdings in ganz verschiedener Weise versucht, diese Fragen zu beantworten. Der erstere²⁹³) stützt sich auf die Bemerkung, dass einer Potenzreihe nach einem genau definierten Gesetze unendlich viele, aus rationalen Funktionen zusammengesetzte unendliche Kettenbrüche zugeordnet werden können, von denen jeder einzelne umgekehrt auch die Gesamtheit aller übrigen und die Koeffizienten der ursprünglichen Potenzreihe vollständig bestimmt. Sind unter diesen Kettenbrüchen solche, welche gleichzeitig mit $\sum a_v x^v$ konvergieren, so stimmt ihr Grenzwert mit der Summe $\sum a_v x^v$ überein. Es kann aber auch solche geben, welche konvergieren, wo die

290) Dies erklärt sich ganz naturgemäss aus dem Umstande, dass man zu jener Zeit unter „Reihenentwicklungen“ schlechthin zunächst immer nur Potenzreihen verstand. Andererseits war man gerade deshalb auch sehr geneigt, jeder anderen Reihe ohne weiteres die Eigenschaften einer Potenzreihe beizulegen.

291) Vgl. Fussn. 287. — Gewisse, aus Umformungen der divergenten harmonischen Reihe von E. abgeleitete Resultate lassen sich einfacher mit Hilfe des Grenzüberganges: $\lim_{\varrho=0} \sum_{v=0}^{\infty} \frac{1}{v^{1+\varrho}}$ rechtfertigen.

292) Dies gilt insbesondere bezüglich der Transformation und Summation divergenter Reihen mit Hilfe der in Nr. 37 erwähnten Euler'schen Methode, da die rechte Seite der Gl. (43) dort, wo sie überhaupt konvergiert, bzw. falls sie sich auf eine endliche Gliederzahl reduziert, die „analytische Fortsetzung“ (II B 1) von $\sum a_v x^v$ liefert. Vgl. Math. Ann. 50 (1898), p. 458. — Par. C. R. 126 (1898), p. 632.

293) Acta math. 18 (1894), p. 97.

Reihe *divergiert*²⁹⁴); diese letzteren können dann als *Ersatz* für die *divergente* Reihe, also gewissermassen als *Definition* für die *Summe der divergenten Reihe* dienen. Auf Grund dieser Definition lässt sich dann zeigen, dass die Regeln der Addition und Multiplikation auch für *divergente* Potenzreihen gültig bleiben²⁹⁵).

Den Ausgangspunkt der *Borel'schen* Untersuchung²⁹⁶) bildet eine direkte Verallgemeinerung des *Grenzbegriffs* mit Hülfe der Gleichung:

$$(49) \quad \lim_{t=+\infty} e^{-t} \sum_{n=0}^{\infty} s_n \cdot \frac{t^n}{n!} = \lim_{n=\infty} s_n,$$

deren Richtigkeit zunächst für den Fall erweisbar ist, dass $\lim_{n=\infty} s_n$

(als endlich oder unendlich) *existiert*. Sind nun aber $\lim_{n=\infty} s_n$ und $\lim_{n=\infty} \overline{s_n}$

verschieden, so kann immerhin der in Gl. (49) *links* stehende Grenzwert *existieren* und alsdann zur *Definition* einer *Verallgemeinerung von* $\lim s_n$ („*limite généralisée*“) dienen, in Zeichen etwa:

$$(50) \quad \lim_{n=\infty} \text{gen } s_n = \lim_{t=+\infty} e^{-t} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} s_n \cdot \frac{t^n}{n!}.$$

294) Dies gilt sogar, wenn $\sum a_n x^n$ *beständig divergiert*. Auf die Existenz solcher Kettenbruchentwickelungen ist man durch diejenige des Ausdrucks

$e^{x^2} \cdot \int_x^{\infty} e^{-x^2} \cdot dx$ aufmerksam geworden, welcher andererseits eine *beständig di-*

vergente Potenzreihe liefert. Die gewöhnlich *P. S. Laplace* zugeschriebene (*Mécan. cél.* 2, Livre X. Oeuvres 4, p. 254) *formale Umwandlung* dieser letzteren in jenen *konvergenten* Kettenbruch findet sich übrigens (abgesehen von einem unwesentlichen Unterschiede in der Bezeichnung) schon vollständig bei *Euler*: *De ser. diverg. a. a. O.* p. 236 (nebst einer *konvergenten* Kettenbruchentwickelung des neuerdings von *Laguerre* — vgl. Nr. 38, Fussn. 273 — behandelten Integrals

$\int_x^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx$). Und während *Laplace* mit der an sich ungerechtfertigten formalen

Umwandlung der *divergenten* Potenzreihe in den *konvergenten* Kettenbruch sich begnügt, lehrt *Euler* (a. a. O. p. 232 ff.) schon diejenige Methode, welche späterhin von *K. G. J. Jacobi* (*J. f. Math.* 12 [1834], p. 346) zur Legitimierung der *Laplace'schen* Entwickelung angegeben wurde: die Integration einer Differenzialgleichung, welche durch das betreffende bestimmte Integral (und auch *rein formal* durch die *divergente* Potenzreihe) befriedigt wird, mit Hülfe eines unendlichen Kettenbruches.

295) Im übrigen ist diese Theorie noch in vieler Beziehung unvollständig. Verschiedene lehrreiche Ergänzungen kann man den Abhandlungen von *T. J. Stieltjes* (*Ann. Toul.* 8 [1894], p. 1—122, 9 [1895], p. 1—47) entnehmen.

296) *J. de Math.* 4, 12 (1896), p. 103. Vgl. auch: *Par. C. R.* 122 (1896), p. 73. 805. Auch diese Theorie bedarf noch der Vervollständigung und zum Teil sogar der Berichtigung.

Substituiert man speziell: $s_n = s_n(x) = \sum_0^n a_v x^v$, so wird überall da, wo $\sum_0^\infty a_v x^v$ konvergiert, $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n(x) = \sum_0^\infty a_v x^v$, und die Umkehrung dieser Beziehung bietet dann wiederum die Möglichkeit, $\sum_0^\infty a_v x^v$ dort zu definieren, wo die Reihe (*uneigentlich*) divergiert. Die logische Zweckmässigkeit dieser an sich zunächst ziemlich willkürlich erscheinenden Definition ergibt sich dann aus der Thatsache, dass (unter gewissen noch erforderlichen Einschränkungen) $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n(x)$ wirklich die *analytische Fortsetzung* $f(x)$ von $\sum_0^\infty a_v x^v$ liefert. Wie Gl. (50) zeigt, kann in diesem Falle $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n(x)$ für irgend eine Divergenzstelle x' sogar dann zur *numerischen* Berechnung von $f(x')$ dienen, wenn nur der *numerische* Wert der einzelnen $s_n(x')$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), d. h. schliesslich der *numerische* Wert der einzelnen *Reihenglieder*, nicht deren *analytisches* Bildungsgesetz bekannt ist.

[In diesem Artikel wurde wesentlich nur die *allgemeine* Theorie der Reihen mit *constanten* Gliedern behandelt. Über *spezielle* Reihen dieser Art, sowie *Funktional-Reihen* sind insbesondere zu vergleichen: *Arithmetische Reihen* (I D 3, I E). — *Recurrente Reihen* (I E und Entwicklung rationaler Funktionen in Potenzreihen). — *Harmonische und Dirichlet'sche Reihen* (I C 3). — *Gleichmässig und ungleichmässig konvergente Reihen* (II A 1). — *Potenzreihen* (II B 1). — *Hypergeometrische Reihen* (II B 1). — *Fourier'sche Reihen* (II A 8). — *Summation von Reihen* (II A 2, 3, 4).]

IV. Unendliche Produkte, Kettenbrüche und Determinanten.

41. Unendliche Produkte. Historisches. Auch die Einführung *unendlicher Produkte* knüpft sich unmittelbar an das für die gesamte Grenzwertlehre als grundlegend erkannte *Quadratur-Problem*, speziell an die Quadratur des Kreises. Schon *Vieta* stellte das Verhältnis des Quadrates mit der Diagonale 2 zur Fläche des umschriebenen Kreises, also die Zahl $\frac{2}{\pi}$, durch das unendliche Produkt dar²⁹⁷⁾:

$$(51) \quad \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2}}}} \cdots$$

297) Francisci Vietae opera math. Ed. Schooten, Lugd. Bat. 1646, p. 400. — Konv.-Beweis von *Rudio*, Ztschr. f. Math. 36 (1891), Hist. Abt. p. 139. — Verallgemeinerungen dieser Formel bei *Euler*, Opusc. analyt. 1 (1785), p. 346 — und *L. Seidel*, J. f. Math. 73 (1871), p. 273 ff.

Und kurze Zeit darauf gab Wallis die nach ihm benannte Formel²⁹⁸⁾:

$$(52) \quad \frac{\pi}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{6} \cdots$$

Durch ein Problem der *Wahrscheinlichkeitsrechnung*²⁹⁹⁾ wurde Dan. Bernoulli auf das folgende unendliche Produkt geführt³⁰⁰⁾:

$$(53) \quad \sqrt[2]{\alpha+1} \cdot \sqrt[4]{\alpha+2} \cdot \sqrt[8]{\alpha+4} \cdot \sqrt[16]{\alpha+8} \cdots$$

Die prinzipielle Wichtigkeit dieses Darstellungsmittels hat indessen erst Euler genügend erkannt und dasselbe vielfach mit glänzendem Erfolge verwertet. Das von ihm behufs *Interpolation*³⁰¹⁾ von $n!$ aufgestellte unendliche Produkt³⁰²⁾:

$$(54) \quad \frac{1^{1-\omega} \cdot 2^\omega}{1+\omega} \cdot \frac{2^{1-\omega} \cdot 3^\omega}{2+\omega} \cdot \frac{3^{1-\omega} \cdot 4^\omega}{3+\omega} \cdots,$$

in Verbindung mit der gleichfalls zuerst von ihm gegebenen Darstellung der *trigonometrischen Funktionen* durch *unendliche Produkte*³⁰³⁾, darf geradezu als *fundamental* für die Theorie der *eindeutigen analytischen Funktionen*³⁰⁴⁾ gelten. Kaum minder wichtig für die *analytische Zahlentheorie*³⁰⁵⁾ erweist sich die gleichfalls von ihm herrührende Produktdarstellung³⁰⁶⁾:

$$(55) \quad \sum_1 \frac{1}{p^n} = \left(\prod_1 \left(1 - \frac{1}{p^n} \right) \right)$$

(wo (p_n) die Reihe der Primzahlen), und eine Anzahl anderer (s. Gl.

(64) — (66)).

Allgemeine Regeln über die *Konvergenz* und *Divergenz* unend-

298) Arithm. infin. (1659): Opera 1, p. 468. Näheres darüber bei Reiff p. 6 ff.

299) Vgl. I D 1.

300) De mensura sortis. Comment. Petrop. T. V (ad ann. 1730. 31), p. 188. — Konv.-Beweis in der von mir besorgten deutschen Ausgabe (Leipzig 1896), p. 53, Fuss. 12.

301) Vgl. I D 3.

302) Brief an Chr. F. Goldbach 13. Oct. 1729 (Corresp. math. et phys., éd. P. H. Fuss, Pétersb. 1843, p. 3). Inst. calc. diff. P. II. Cap. XVII, p. 834.

303) Introd. 1, Cap. 19, p. 120.

304) Vgl. II B 1. — Das obige Produkt stimmt *genau* überein mit demjenigen von Gauss (Werke 3, p. 146) für $\omega \cdot \Pi(\omega - 1) \cdot \Pi(\omega)$, welches Weierstrass (Werke 2, p. 91) ausdrücklich als Vorbild der von ihm ersonnenen Produkte von *Primfunktionen* zitiert. Jenes erste *typische Beispiel* einer solchen Produktdarstellung findet sich also in Wahrheit schon bei Euler.

305) Vgl. I C 3.

306) Introd. 1, Cap. XV, p. 225.

licher Produkte³⁰⁷⁾ hat zuerst *Cauchy* angegeben³⁰⁸⁾; dieselben beruhen auf der Beziehung:

$$\lg \prod_{v=0}^{\infty} (1 + u_v) = \sum_{v=0}^{\infty} \lg (1 + u_v)$$

und der Entwicklung von $\lg (1 + u_v)$ in eine Potenzreihe. *Weierstrass* hat gezeigt³⁰⁹⁾, dass man die Fundamentalsätze über die Konvergenz und Divergenz unendlicher Produkte auch ganz direkt, *ohne* Benützung dieses transcendenten Hilfsmittels herleiten kann. Mit Festhaltung dieses Grundgedankens habe ich späterhin eine zusammenhängende elementare Theorie der unendlichen Produkte entwickelt³¹⁰⁾.

42. Konvergenz und Divergenz. Setzt man: $\prod_{v=0}^n (1 + u_v) = U_n$,

so heisst das *unendliche* Produkt: $\prod_{v=0}^{\infty} (1 + u_v)$, wo durchweg

$|1 + u_v| > a > 0$ angenommen wird, *konvergent* und U der Wert desselben, wenn $\lim U_n = U$ endlich und von Null verschieden ist. In jedem anderen Falle heisst das Produkt *divergent*, insbesondere also auch dann, wenn $\lim U_n = 0$. Der Ausschluss der Produkte mit dem Grenzwerte 0 aus der Klasse der als *konvergent* zu bezeichnenden erweist sich als unbedingt notwendig, wenn ein *konvergentes* Produkt die *fundamentale* Eigenschaft eines *endlichen* Produktes behalten soll, *nicht* zu verschwinden, so lange *kein* einzelner Faktor verschwindet³¹¹⁾. Die *zwei* für die *Konvergenz* von $\prod (1 + u_v)$ hiernach *notwendigen* und *hinreichenden* Bedingungen, nämlich:

$$(56) \quad |U_q| > g > 0, \quad |U_{n+q} - U_n| < \varepsilon \quad (q = 0, 1, 2, \dots),$$

lassen sich vollständig durch die folgende *einzige* ersetzen:

$$(57) \quad \left| \frac{U_{n+q}}{U_n} - 1 \right| < \varepsilon \quad (q = 0, 1, 2, \dots),$$

welche aussagt, dass das „*Restprodukt*“: $\prod_{v=n+1}^{n+q} (1 + u_v)$ bei passender

Wahl von n und für jedes q der 1 beliebig nahe kommen muss, also den bis dahin erzielten Produktwert U_n nicht mehr wesentlich ändert.

307) Ein spezielles Kriterium für die Beurteilung unendlicher Produkte, welches im wesentlichen dem Reihenkriterium von *Gauss* (Nr. 22) entspricht, hat, wie *G. Eneström* (Jahrb. Fortschr. d. Math. 11 [1879], p. 38) bemerkte, schon *Stirling* (Method. diff. 1730, p. 37) angegeben.

308) Anal. algèbr. Note 9, p. 561.

309) J. f. Math. 51 (1856), p. 18 ff. — Werke 1, p. 173 ff.

310) Math. Ann. 33 (1889), p. 119. Vgl. auch 42 (1893), p. 183.

311) Vgl. meine Bemerk. a. a. O., p. 125 Fussn., p. 140 Fussn.

Mit dem Produkte $\prod(1+|u_v|)$ konvergiert auch allemal das Produkt $\prod(1+u_v)$ und heisst dann *absolut* konvergent; dasselbe konvergiert in diesem Falle unabhängig von der Anordnung der Faktoren, also *unbedingt*. Umgekehrt lässt sich aber auch zeigen, dass ein *unbedingt* konvergentes Produkt auch *absolut* konvergieren muss³¹²). Als *notwendig und hinreichend* für die *absolute und unbedingte Konvergenz* von $\prod(1+u_v)$ erweist sich die *Konvergenz* der Reihe $\sum|u_v|$.³¹³)

Ist $\sum u_v$ nur *bedingt* konvergent, so konvergiert $\prod(1+u_v)$ oder *divergiert nach Null*, je nachdem $\sum u_v^2$ konvergiert oder *divergiert*³¹⁴). Im ersteren Fall konvergiert $\prod(1+u_v)$ nur *bedingt*, lässt sich in zwei Produkte von der Form $\prod(1+a_v)$, $\prod(1+b_v)$ ($a_v > 0$, $b_v > 0$) zerfällen, von denen das erste nach $+\infty$, das zweite nach 0 *divergiert*, und die sich wiederum ganz nach Analogie des in Nr. 31 erwähnten *Riemann'schen* Reihensatzes zu *konvergenten* Produkten von *beliebig vorzuschreibendem* Werte vereinigen lassen. Die von mir bezüglich der Wertveränderungen *bedingt konvergenter Reihen* gefundenen Resultate lassen sich auch auf solche *Produkte* übertragen³¹⁵).

43. Umformung von unendlichen Produkten in Reihen. Vermöge der Identität:

$$(58) \quad s_n = s_0 + \sum_1^n (s_v - s_{v-1})$$

lässt sich *jeder* Grenzwert $s = \lim s_n$ durch die unendliche *Reihe*:

$$(59) \quad s = s_0 + \sum_1^\infty (s_v - s_{v-1})$$

312) A. a. O., p. 135 ff.

313) Man kann also aus der etwa anderweitig erkannten Konvergenz oder Divergenz von $\prod(1+|u_v|)$ auch diejenige von $\sum|u_v|$ erschliessen. Vgl. *Weierstrass*, Werke 1, p. 175.

314) Die vorangehenden Sätze gelten auch für *komplexe* u_v , der letzte in dieser Fassung nur für *reelle*. (Von *Cauchy* mit Hülfe der logarithm. Reihe bewiesen: a. a. O. p. 563; rein elementar von mir: a. a. O. p. 150, einfacher: 44, p. 413.) Eine Verallgemeinerung des Satzes für *komplexe* u_v habe ich *Math. Ann.* 22 (1883), p. 480 angegeben. — Auch wenn $\sum u_v$ *divergiert*, lassen sich noch bestimmte Aussagen über verschiedenartiges Verhalten des Produktes $\prod(1+u_v)$ machen, welches selbst in diesem Falle noch *konvergieren* kann (a. a. O. 33, p. 152 ff.).

315) *Math. Ann.* 22, p. 481.

darstellen³¹⁶). Die Anwendung dieser Methode auf $U_n = \prod_{v=0}^n (1 + u_v)$ giebt die für jedes konvergente (oder auch nach 0 bzw. $+\infty$ divergierende) Produkt gültige Reihendarstellung:

$$(60) \quad \prod_{v=0}^{\infty} (1 + u_v) = 1 + u_0 + \sum_1^{\infty} U_{v-1} \cdot u_v.$$

Konvergiert das Produkt und somit auch $\sum u_v$ absolut, so gestattet diese Reihe jede beliebige Anordnung³¹⁷), insbesondere die folgende:

$$(61) \quad \prod_{v=0}^{\infty} (1 + u_v) = 1 + \sum_{\kappa} u_{\kappa} + \sum_{\kappa, \lambda} u_{\kappa} u_{\lambda} + \sum_{\kappa, \lambda, \mu} u_{\kappa} u_{\lambda} u_{\mu} + \dots,$$

wobei die Summen \sum_{κ} , $\sum_{\kappa, \lambda}$, $\sum_{\kappa, \lambda, \mu}$, ... über alle möglichen Kombinationen der u_v zur 1^{ten}, 2^{ten}, 3^{ten}, ... Klasse zu erstrecken sind. Ist also $u_v = a_v x$, $\sum |a_v|$ konvergent, so hat man für jedes endliche x :³¹⁸)

$$(62) \quad \prod_{v=0}^{\infty} (1 + a_v x) = 1 + \sum_1^{\infty} A_v x^v \quad (A_1 = \sum a_v, A_2 = \sum a_v a_{\lambda}, \text{ etc.})$$

und allgemeiner:

316) Vermöge der (lediglich an die Beschränkung: $|s_v| \geq \alpha > 0$ gebundenen) analogen Identität:

$$(58a) \quad s_n = s_0 \prod_1^n \frac{s_v}{s_{v-1}}$$

lässt sich auch jeder Grenzwert $s = \lim s_n$ durch das unendliche Produkt:

$$(59a) \quad s = s_0 \prod_0^{\infty} \frac{s_v}{s_{v-1}}$$

darstellen. Ist also speziell: $s_n = \sum_0^n u_v = s_{n-1} + u_n$, so wird

$$(60a) \quad \sum_0^{\infty} u_v = u_0 \cdot \prod_0^{\infty} \left(1 + \frac{u_v}{s_{v-1}}\right).$$

Hieraus ergibt sich z. B. der Nr. 26, Fussn. 2 erwähnte *Abel'sche* Satz, dass gleichzeitig mit der Reihe $\sum u_v$ (wo $u_v > 0$) stets auch $\sum \frac{u_v}{s_{v-1}}$ divergiert.

Im übrigen ist aber die Transformation (60a) von wesentlich geringerer Bedeutung als die umgekehrte (60). Beispiele für ihre Anwendung giebt *Stern*, Journ. f. Math. (1834), p. 353.

317) Vgl. z. B. die *Euler'sche* Formel (55).

318) Ein solches Produkt stellt dann nach *Weierstrass'* Bezeichnung eine

$$(63) \quad \prod_0^{\infty} (1 + \sum_1^{\infty} a_v^{(\mu)} x^{\mu}) = 1 + \sum_1^{\infty} A_v x^v,$$

so lange $\sum_v^{\infty} \sum_1^{\infty} |a_v^{(\mu)} x^{\mu}|$ konvergiert.

Bei geeigneter Spezialisierung der a_v , $a_v^{(\mu)}$ lassen sich die unendlichen Reihen, welche zunächst zur Darstellung der A_v sich ergeben, mit Hilfe von Rekursionsformeln summieren. Schon *Euler* fand durch die Substitutionen $a_v = q^{v+1}$, $a_v^{(\mu)} = q^{\mu(v+1)}$ ($|q| < 1$) die Beziehungen³¹⁹⁾:

$$(64) \quad \prod_1^{\infty} (1 + q^v x) = 1 + \sum_1^{\infty} \frac{q^{\frac{1}{2}v(v+1)}}{(1-q) \cdots (1-q^v)} \cdot x^v,$$

$$(65) \quad \prod_1^{\infty} (1 - q^v x)^{-1} = 1 + \sum_1^{\infty} \frac{q^v}{(1-q) \cdots (1-q^v)} \cdot x^v,$$

und aus der ersten derselben für $x = -1$ und durch Entwicklung nach Potenzen von q die folgende³²⁰⁾:

$$(66) \quad \prod_1^{\infty} (1 - q^v) = 1 + \sum_1^{\infty} (-1)^v \cdot \left(q^{\frac{1}{2}v(3v-1)} + q^{\frac{1}{2}v(3v+1)} \right).$$

Durch *Jacobi's* Untersuchungen ist der enge Zusammenhang dieser von *Euler* für zahlentheoretische³²¹⁾ Zwecke aufgestellten Formeln und ähnlicher auf analoge Weise zu gewinnender mit der Theorie der elliptischen Funktionen³²²⁾ festgestellt worden. Derselbe beruht auf dem Umstande, dass die zur Darstellung der elliptischen Funktionen

ganze transcendente Funktion mit den Nullstellen $x = -\frac{1}{a_v}$ dar. Über die *Weierstrass'sche* Verallgemeinerung dieser Formel (Nr. 41, Fussn. 404) für den Fall, dass $\sum |a_v|$ divergiert, vgl. II B 1.

319) Introd. T. I, Cap. XVI: De partitione numerorum, p. 259. 263.

320) L. c. p. 270. Dort zunächst nur durch Induktion gefunden, bald darauf von *E.* analytisch bewiesen; Petrop. Novi Comment. 5 (ad ann. 1754. 55), p. 75. — Einfacherer Beweis von *Legendre*: Théorie des nombres (1830), T. 2, p. 128. — *Jacobi* ist mehrmals auf diese Formel zurückgekommen und hat ausser zwei elementaren Beweisen (J. f. Math. 21 [1840], p. 13; 32 [1846], p. 164 = Werke 6, p. 281. 303), deren zweiter eine Modifikation des *Euler'schen* ist, noch drei weitere mit Hilfe der elliptischen Funktionen gegeben (Fundam. nova, § 62. 63 u. 64—66 = Werke 1, p. 228 ff.; 2, p. 153 J. f. Math. 36 [1848], p. 75).

321) Über die zahlentheoretische Verwertung der Formeln (64) bis (66) vgl. IC 3.

dienlichen *Jacobi'schen Thetafunktionen*³²³⁾ sich aus Produkten von der Form:

$$(67) \quad \prod_1^{\infty} (1 \pm q^{\nu} \cdot x^{\pm 1}), \quad \prod_1^{\infty} (1 \pm q^{2\nu+1} \cdot x^{\pm 1})$$

zusammensetzen lassen³²³⁾. Von den weiteren in dem genannten Zusammenhange von *Jacobi* abgeleiteten Reihendarstellungen unendlicher Produkte will ich als besonders merkwürdig noch die folgenden hervorheben³²⁴⁾:

$$(68) \quad \prod_1^{\infty} \frac{1 - q^{\nu}}{1 + q^{\nu}} = 1 - 2 \sum_1^{\infty} (-1)^{\nu} \cdot q^{\nu^2},$$

$$(69) \quad \prod_1^{\infty} \frac{1 - q^{2\nu}}{1 - q^{2\nu-1}} = 1 + \sum_1^{\infty} q^{\frac{1}{2}\nu(\nu+1)},$$

$$(70) \quad \prod_1^{\infty} (1 - q^{\nu})^3 = 1 + \sum_1^{\infty} (-1)^{\nu} \cdot (2\nu + 1) \cdot q^{\frac{1}{2}\nu(\nu+1)}.$$

44. Faktoriellen und Fakultäten. *Cauchy* hat Produkte von der Form $\prod(1 + a_{\nu}x)$, bei welchen die a_{ν} wie in (67) eine *geometrische Progression* bilden, als *geometrische Faktoriellen* bezeichnet³²⁵⁾ und eine allgemeine elementare Theorie derselben entwickelt³²⁶⁾. Dieselbe liefert insbesondere Transformationen in unendliche Reihen, welche die *Euler'schen* Formeln und die Entwicklungen der elliptischen Funktionen als spezielle Fälle umfassen.

Als *arithmetische Faktoriellen* hätte man nach *Cauchy* solche $\prod(1 + a_{\nu}x)$ oder etwas allgemeiner $\prod(u + a_{\nu}x)$ zu bezeichnen, bei denen die a_{ν} eine *arithmetische Progression* bilden und die sonst zu meist numerische und analytische *Fakultäten* oder auch *Faktoriellen* schlechthin genannt werden³²⁷⁾. Setzt man etwa $a_{\nu} = a + \nu b$ und schreibt wiederum u statt $u + a$, x statt bx , so folgt, dass man $\prod(u + a_{\nu}x)$ stets auf die Form $\prod(u + \nu x)$ bringen kann. Da nun solche *unendliche* Produkte offenbar stets *divergieren* müssen, so handelt es sich hierbei zunächst um *endliche* Produkte von der Form:

322) Vgl. II B 6a, 7.

323) *Jacobi*, Fundamenta, § 64 (Werke 1, p. 232). Vgl. auch *Gauss'* Nachlass (Werke 3, p. 434). — *Ch. Biehler*, J. f. Math. 88 (1880), p. 186.

324) Fundam. § 66 (Werke 1, p. 237). Die Formel (69) auch bei *Gauss*, Werke 2, p. 20.

325) Par. C. R. 17 (1843), p. 641.

326) Par. C. R. 17, p. 523. 640. 693. 921. 1159.

327) Die Terminologie ist sehr schwankend.

$f(u, x, n) = \prod_{v=0}^{n-1} (u + vx)$ und sodann um deren *Interpolation* für den

Fall, dass eine beliebige Zahl y an die Stelle der natürlichen Zahl n tritt; diese führt auf gewisse unendliche Produkte (zur Darstellung von $f(u, x, y)$), welche als *analytische Fakultäten* bezeichnet zu werden pflegen.

Das fragliche Problem ist zuerst von Euler³²⁸), in speziellerer Form von Vandermonde³²⁹) behandelt worden. Die erste ausführliche Theorie der *Fakultäten* hat sodann Kramp geliefert³³⁰), an welche sich weitere Arbeiten von Bessel³³¹), Crelle³³²), Ohm³³³) und Öttinger³³⁴) anschliessen. Weierstrass hat gezeigt, dass alle diese auf rein formale Behandlungsweise gegründeten Theorien auf mannigfache Widersprüche führen³³⁵), und hat eine völlig neue, wesentlich auf *funktionentheoretischer* Grundlage ruhende Theorie der *analytischen Fakultäten* entwickelt. Die letzteren werden dabei auf das von W. speziell als *Faktorielle* bezeichnete, für jedes endliche (reelle oder complexe) u konvergierende Produkt:

$$(71) \quad \text{Fc}(u) = u \prod_{v=1}^{\infty} \left(\frac{v}{v+1} \right)^u \cdot \left(1 - \frac{u}{v} \right)$$

zurückgeführt, welches sich als identisch mit dem Legendre'schen $\Gamma(u)$ oder dem Gauss'schen $\frac{1}{\Pi(u-1)}$ erweist³³⁶) und dessen prinzipielle Bedeutung vor allem darin besteht, dass es den Ausgangspunkt für die Nr. 41, 42, Fussn. 304. 318 erwähnten Untersuchungen gebildet hat.

45. Allgemeine formale Eigenschaften der Kettenbrüche. Als *n-gliedrige Kettenbruch*³³⁷) bezeichnet man einen Ausdruck von der Form:

328) Inst. calc. diff. 2, p. 332. Vgl. Nr. 41, Formel (54).

329) Vgl. Nr. 10, Fussn. 70. V. behandelt nur den Fall: $f(u, -1, y)$ und bezeichnet die f als *Potenzen zweiter Ordnung*.

330) Analyse des réfractions astronomiques et terrestres, Chap. III, Nr. 142 bis 203. — Gergonne, Ann. 3 (1812), p. 1.

331) Königsb. Archiv f. Naturw. u. Math. 1812. Abh. 2, p. 343.

332) Theorie der analyt. Facultäten, Berlin 1824. J. f. Math. 7 (1831), p. 356.

333) J. f. Math. 39 (1850), p. 23.

334) Ibid. 33 (1846), p. 1 (hier eine übersichtliche Zusammenstellung der bis dahin gebrauchten verschiedenen Definitionen und Bezeichnungen). p. 117. 226. 329; 35 (1847), p. 13; 38 (1849), p. 162. 216; 44 (1852), p. 26. 147.

335) J. f. Math. 51 (1856), p. 1 ff. Der kritische Teil ausführlicher in dem Wiederabdruck dieser Abh.: Werke 1, p. 153 ff.

336) Vgl. II A 3.

337) Über die ältere Geschichte der Kettenbrüche vgl. ausser der im Ein-

$$(72) \left\{ \begin{array}{l} b_0 \pm \frac{a_1}{b_1 \pm \frac{a_2}{b_2 \pm \dots \pm \frac{a_{n-1}}{b_{n-1} \pm \frac{a_n}{b_n}}} \\ \text{d. h. eigentlich: } b_0 \pm \frac{a_1}{b_1 \pm \frac{a_2}{b_2 \pm \dots \pm \frac{a_{n-1}}{b_{n-1} \pm \frac{a_n}{b_n}}} \end{array} \right.$$

Derselbe soll hier stets in der gedrängteren Form³³⁸⁾:

$$(73) \quad b_0 \pm \left| \frac{a_1}{b_1} \right| \pm \left| \frac{a_2}{b_2} \right| \pm \dots \pm \left| \frac{a_n}{b_n} \right|$$

geschrieben oder durch das Symbol:

$$(74) \quad \left[b_0; \pm \frac{a_v}{b_v} \right]_1^n$$

bezeichnet werden³³⁹⁾. Die a_v, b_v stellen dabei ganz beliebige Zahlen

gange zitierten Schrift von *S. Günther* deren erweiterte italienische Bearbeitung: *Boncompagni*, *Bulletino di Bibl.* 7 (1874), p. 213. Ibid. p. 451: *Ant. Favaro*, *Notizie storiche sulle frazioni continue*. Auch: *Klügel*, T. 3, p. 88. *M. Cantor*, a. a. O. 2, p. 631. 694; 3, p. 92. 669. — Zusammenhängende Theorien der allgemeinen Kettenbrüche haben ausser *Euler* (*Petrop. Comment.* 9 [1737], p. 98; 11 [1739], p. 22. *Introductio* 1, p. 295) noch *F. A. Möbius* (*J. f. Math.* 6 [1830], p. 216. *Werke* 4, p. 505) und sehr ausführlich *M. A. Stern* (*J. f. Math.* 10 [1833], p. 1. 154. 241. 364; 11 [1834], p. 33. 142. 277. 311) entwickelt. *Lagrange* (*Add. aux Éléments d'Algèbre d'Euler: Oeuvres* 7, p. 8) und *Legendre* (*Théorie des nombres* [1830], 1, p. 17) haben nur aus *ganzen* Zahlen zusammengesetzte, insbesondere sog. *regelmässige* Kettenbrüche behandelt. Im übrigen vgl. die citirten Lehrbücher von *Stern*, *Schlömilch*, *Hattendorff* und *Stolz*; auch: *J. A. Serret*, *Cours d'Algèbre supérieure* (Paris 1885), I, p. 7.

338) Diese Schreibweise scheint mir charakteristischer, als die zumeist verbreitete: $b_0 \pm \frac{a_1}{b_1} \pm \frac{a_2}{b_2} \pm \dots \pm \frac{a_n}{b_n}$, welche nach *Baltzer's* Angabe (*El. der Math.* 1, p. 189, Fussn.) von *J. H. T. Müller* (*Allg. Arithm.*, Halle 1838) herrührt (vgl. übrigens Nr. 9, Fussn. 52).

339) Allgemein bezeichne ich also durch das Symbol $\left[b_m; + \frac{a_v}{b_v} \right]_{m+1}^n$ den Kettenbruch $b_m \pm \left| \frac{a_{m+1}}{b_{m+1}} \right| \pm \dots \pm \left| \frac{a_n}{b_n} \right|$. Dabei schreibe ich statt $\left[0; \pm \frac{a_v}{b_v} \right]_{m+1}^n$ kürzer: $\left[\pm \frac{a_v}{b_v} \right]_{m+1}^n$, so dass also: $\left[b_m; \pm \frac{a_v}{b_v} \right]_{m+1}^n = b_m + \left[\pm \frac{a_v}{b_v} \right]_{m+1}^n$. — *Stern* bedient sich a. a. O. des allzu undeutlichen Symbol: $F(b_0, b_n)$ oder auch des wenig übersichtlichen: $F(b_0 \pm a_1 : b_1 \pm a_2 : b_2 \pm \dots)$. *E. Heine* (*Handb. der Kugelf.* 1 [1878], p. 261) schreibt dafür: $\left| \begin{array}{cccc} \mp a_1 & \mp a_2 & \dots & \mp a_n \\ b_0 & b_1 & b_2 & b_n \end{array} \right|$. Ist durchweg $\pm a_v = 1$, so pflegt man den betreffenden Kettenbruch nach *Dirichlet* (*Werke* 2,

vor, nur wird man naturgemäss die $|a_v| > 0$ voraussetzen, während von den b_v beliebig viele, mit *einzigster Ausnahme*³⁴⁰⁾ von b_n , auch $= 0$ sein können; im übrigen unterliegen die letzteren noch gewissen Beschränkungen, sofern der Kettenbruch überhaupt einen *bestimmten Sinn* haben, d. h. eine bestimmte *Zahl* vorstellen soll.

Man nennt a_0 das *Anfangsglied*, $\pm \frac{a_v}{b_v}$ das v^{te} *Glied* oder den v^{ten} *Teilbruch*, $\pm a_v$ bzw. b_v den v^{ten} *Teilzähler* bzw. *Teilnenner* des Kettenbruches. Verwandelt man den Kettenbruch $\left[b_0; \frac{a_v}{b_v} \right]_1^{\infty}$ ³⁴¹⁾ durch successives Fortschaffen der Teilnenner in einen gewöhnlichen Bruch $\frac{A_v}{B_v}$ und zwar *rein formal* (d. h. insbesondere ohne Anwendung von *Reduktionen*, falls im Laufe der Rechnung infolge *besonderer* Beschaffenheit der a_v , b_v *reduktible* Brüche auftreten sollten³⁴²⁾), so ergibt sich zunächst:

$$(75a) \quad \begin{aligned} A_0 &= b_0 & B_0 &= 1 \\ A_1 &= b_1 \cdot A_0 + a_1 & B_1 &= b_1 \cdot B_0 \end{aligned}$$

und sodann (durch vollständige Induktion) für $v \geq 2$ die Rekursionsformel³⁴³⁾:

$$(75b) \quad A_v = b_v \cdot A_{v-1} + a_v \cdot A_{v-2}, \quad B_v = b_v \cdot B_{v-1} + a_v \cdot B_{v-2}.$$

Fällt hierbei B_v von Null verschieden aus, so heisst $\frac{A_v}{B_v}$ der v^{te} *Näherungsbruch* und im Falle $v = n$ der *Wert* des Kettenbruches:

$$(76) \quad K_n = b_0 + \frac{a_1}{b_1} + \frac{a_2}{b_2} + \dots + \frac{a_n}{b_n}.$$

p. 141) mit (b_0, b_1, \dots, b_n) zu bezeichnen, während dieses nämliche Symbol bei Möbius a. a. O. den Kettenbruch $\frac{1}{b_0} - \frac{1}{b_1} - \dots - \frac{1}{b_n}$ bedeutet.

340) Indessen darf immerhin $\lim b_n = 0$ werden, wenn man die b_v als Funktionen einer Veränderlichen auffasst; in diesem Falle geht der Kettenbruch (73, in den folgenden über: $b_0 \pm \frac{a_1}{b_1} \pm \dots \pm \frac{a_{n-2}}{b_{n-2}}$. (Nur auf diese Art können z. B. diejenigen Schlüsse legalisiert werden, die Möbius — Werke, 4, p. 507 — zieht, indem er einfach $b_n = 0$ setzt.)

341) Es ist keine Beschränkung der Allgemeinheit, wenn ich von jetzt ab nur a_v statt $\pm a_v$ schreibe, da ja die a_v an sich beliebiges Vorzeichen besitzen dürfen.

342) Über diese Möglichkeit vgl. Stern a. a. O. 2, p. 13.

343) Dem Sinne nach schon bei Wallis, Arithm. infinit. p. 191 (Opera 1, p. 475). — Verallgemeinerung der Rekursionsformel (75b) bei Stolz a. a. O. 2, p. 268.

Aus (75) ergibt sich die für die gesamte Lehre von den Kettenbrüchen fundamentale Relation³⁴⁴):

$$(77) \quad \frac{A_\nu}{B_\nu} - \frac{A_{\nu-1}}{B_{\nu-1}} = (-1)^{\nu-1} \cdot \frac{a_1 \cdot a_2 \cdots a_\nu}{B_{\nu-1} \cdot B_\nu} \quad (1 \leq \nu \leq n)$$

und in ähnlicher Weise die allgemeinere:

$$(78) \quad \frac{A_\nu}{B_\nu} - \frac{A_\mu}{B_\mu} = (-1)^\mu \cdot \frac{a_1 \cdot a_2 \cdots a_{\mu+1} \cdot B_{\mu+1, \nu}}{B_\mu \cdot B_\nu} \quad (\mu \leq \nu - 1),$$

wenn noch gesetzt wird:

$$(79) \quad a_x + \left| \frac{a_{x+1}}{b_{x+1}} \right| + \cdots + \left| \frac{a_\nu}{b_\nu} \right| = \frac{A_{x, \nu}}{B_{x, \nu}} \quad (x \leq \nu).$$

Vermöge der Identität $\frac{a}{b+r} = \frac{ca}{cb+cr}$ lässt sich jeder Kettenbruch K_n durch unendlich viele ihm völlig äquivalente (d. h. durchweg gleichwertige Näherungsbrüche liefernde) ersetzen, nämlich:

$$(80) \quad K_n = b_0 + \left| \frac{c_1 a_1}{c_1 b_1} \right| + \left| \frac{c_1 c_2 a_2}{c_2 b_2} \right| + \cdots + \left| \frac{c_{n-1} c_n a_n}{c_n b_n} \right|.$$

Durch passende Wahl der c , kann man allemal erzielen, dass sich ergibt:

$$(81) \quad K_n = b_0 + \left| \frac{\alpha_1}{\beta_1} \right| + \left| \frac{\alpha_2}{\beta_2} \right| + \cdots + \left| \frac{\alpha_n}{\beta_n} \right|,$$

wo die α , oder die β , beliebig vorgeschriebene Zahlen sind (mit angemessenem Ausschluss von 0). Wählt man durchweg³⁴⁵ $\alpha_\nu = +1$, so mag der resultierende Kettenbruch als die *Hauptform*³⁴⁶ von K_n bezeichnet werden. Für $\alpha_\nu = -1$ kommt diejenige Form zum Vorschein, deren reciproken Wert *Möbius* als Normalform benützt hat und die von *Seidel*³⁴⁷ die *reduzierte Form*³⁴⁸ von K_n genannt worden ist.

46. Rekursorische und independente Berechnung der Näherungsbrüche. Die Rekursionsformeln (75)³⁴⁹ liefern zugleich auch die Hilfsmittel zur *independenten* Berechnung der A_ν , B_ν .

344) Euler, Petr. Comment. 9, p. 104.

345) Ibid. p. 108.

346) Heine (a. a. O. p. 264) gebraucht diesen Ausdruck, falls die β , natürliche Zahlen sind.

347) Münch. Abh. 2. Kl. 7 (1855), p. 267.

348) Hiervon wohl zu unterscheiden ist der Ausdruck „*reduzierter Kettenbruch*“, mit welchem man nach Stern (a. a. O. p. 4) den Wert des betr. Kettenbruchs, also den Näherungsbruch $\frac{A_n}{B_n}$ zu bezeichnen pflegt.

349) Bei dem entsprechenden Rekursionsverfahren wird mit dem Einrichten

Euler hat für den Fall, dass K_v auf die Hauptform gebracht ist, einen eigenen *Algorithmus* zur Darstellung der A_v, B_v ersonnen³⁵⁰⁾, der sich zwar zur Herleitung gewisser Kettenbruchrelationen als sehr nützlich erweist, dagegen für die A_v, B_v im Grunde genommen nur eine *symbolische*, zur effektiven Berechnung nicht genügend durchsichtige³⁵¹⁾ Darstellung liefert, nämlich:

$$(82) \quad \frac{A_v}{B_v} = \frac{(b_0, b_1, b_2, \dots b_v)}{(b_1, b_2, \dots b_v)},$$

wobei das Symbol $(b_m, b_{m+1}, \dots b_v)$ durch die Rekursionsformel definiert ist:

$$(83) \quad (b_m, b_{m+1}, \dots b_v) = b_v \cdot (b_m, b_{m+1}, \dots b_{v-1}) + (b_m, b_{m+1}, \dots b_{v-2}).$$

Mit diesen *Euler'schen* Symbolen im wesentlichen identisch erweisen sich trotz der zunächst gänzlich verschiedenen Definition die von *Möbius*³⁵²⁾ eingeführten Symbole $[b_0, b_1, \dots b_v]$ — abgesehen davon, dass sich dieselben auf Kettenbrüche von der Form:

$$(84) \quad K_n = b_0 - \frac{1}{|b_1|} - \frac{1}{|b_2|} - \dots - \frac{1}{|b_n|} \quad \left(\text{genauer gesagt: } k_n = \frac{1}{K_n} \right)$$

beziehen. Setzt man nämlich für $m \leq v$:

$$(85) \quad K_{m,v} = b_m - \frac{1}{|b_{m+1}|} - \frac{1}{|b_{m+2}|} - \dots - \frac{1}{|b_v|}$$

(also: $K_{0,v} = K_v, \quad K_{v,v} = b_v$)

und definiert nach *Möbius* das fragliche Symbol durch die Gleichung:

$$(86) \quad [b_0, b_1, b_2, \dots b_v] = K_{0,v} \cdot K_{1,v} \cdot K_{2,v} \cdots K_{v,v},$$

so lässt sich zeigen, dass diese Ausdrücke *ganze rationale* Funktionen ihrer Elemente sind, und man erkennt im übrigen unmittelbar, dass

$$K_{0,v} = \frac{A_v}{B_v} = \frac{[b_0, b_1, b_2, \dots b_v]}{[b_1, b_2, \dots b_v]}$$

in voller Analogie mit der *Euler'schen* Formel (82).

der Brüche *von vorn* begonnen. Man findet $\frac{A_2}{B_2}$ aus: $\frac{A_1}{B_1} - \frac{b_1 A_0 + A_1}{b_1 B_0}$ durch Substitution von $b_1 + \frac{a_2}{b_2}$ an Stelle von b_1 u. s. f. *Stern* hat a. a. O. p. 5 auch

ein mit dem Bruche $\frac{A'_n}{B'_n} = \frac{b_n a_{n-1} + a_n}{b_n}$ beginnendes und rückwärts laufendes

Rekursionsverfahren entwickelt. (Vgl. auch *Stolz* a. a. O. p. 266.)

350) Petrop. Novi Comment. 9 (1764). Vgl. auch *Gauss*, Disquis. arithm. Art. 27 (Werke 1, p. 20). *Dirichlet-Dedekind*, Vorl. über Zahlentheorie § 23.

351) D. h. etwa nach Art einer Determinante. — Eine brauchbare Regel zur Berechnung der *Euler'schen* Symbole hat übrigens *V. Schlegel* angegeben: Z. f. Math. 22 (1877), p. 402.

352) Werke 4, p. 511.

Da die A_v , B_v durch je ein *System linearer Gleichungen* (und zwar, abgesehen von den beiden Anfangsgleichungen (75a) durch das nämliche System) definiert sind, so ergibt sich als nächstliegendes Darstellungsmittel³⁵³⁾ der *Quotient zweier Determinanten*, der sich aber wegen der besonderen Form jener Gleichungen auf eine *einzigste Determinante* reduciren lässt. Für den Fall $a_v = +1$ bzw. $a_v = -1$ wurde dies von *Sylvester* und *Spottiswoode* zuerst hervorgehoben³⁵⁴⁾ Die allgemeine Auflösung der in Frage kommenden *rekurrenten dreigliedrigen Linearsysteme* mit Hülfe von Determinanten wurde aus anderweitiger Veranlassung von *Painvin*³⁵⁵⁾ gegeben und zuerst von *S. Günther*³⁵⁶⁾ für die Darstellung der A_v , B_v prinzipiell verwertet³⁵⁷⁾. Unabhängig davon und ungefähr gleichzeitig wurde die Determinantendarstellung der A_v , B_v von *G. Bauer*³⁵⁸⁾ angegeben und auch von *K. Hattendorff*³⁵⁹⁾ in sehr einfacher Weise abgeleitet.

Während hiernach das Problem, die Näherungsbrüche eines vorgelegten Kettenbruches zu berechnen, auf die Auflösung eines rekurrenten dreigliedrigen Linearsystems führt, so kann umgekehrt jedes solche System zur *Definition* eines bestimmten *Kettenbruches* dienen. Diese schon von *Euler*³⁶⁰⁾ gemachte Bemerkung ist von *G. Bauer*³⁶¹⁾, *Heine*³⁶²⁾ und *Scheibner*³⁶³⁾ mit Vorteil zur Herleitung von Kettenbruchrelationen benützt worden. Durch entsprechende Betrachtung

353) Ich übergehe hier die auf kombinatorischen Betrachtungen beruhenden Berechnungsmethoden von *Hindenburg*, *Eytelwein*, *Stern* (a. a. O. p. 5) und anderen; näheres darüber (nebst zahlreichen einschlägigen litterarischen Notizen) in *S. Günther's* Habilitationsschrift: „Darstellung der Näherungswerte von Kettenbrüchen in independenter Form“. Erlangen 1872.

354) *Philos. Mag.* (4) 5 (1853), p. 453; 6 (1853), p. 297. — *J. f. Math.* 51 (1856), p. 374.

355) *J. de Math.* (2) 3 (1858), p. 41.

356) Hieran wird durch die Bemerkung *Heine's* (*Kugelf.* 1, p. 262, Fussn.), dass ihm der Zusammenhang des gelegentlich (*J. f. Math.* 56 [1859], p. 80) von ihm benützten *Painvin'schen* Resultates mit der *Kettenbruch-Theorie* keineswegs entgangen sei, nichts geändert.

357) In der oben citierten Schrift, deren zweiter Teil eine Anzahl verschiedenartiger Anwendungen jener „Kettenbruchdeterminanten“ (Continuanten), vgl. *IA 2* Nr. 31, enthält.

358) *Münch. Abh.*, 2. Kl., 11 (1872), Abt. II, p. 103.

359) *Einl. in die Lehre von den Determinanten.* Hannover 1872, p. 20. Auch: *Algebr. Anal.* p. 264.

360) *Acta Petrop.* 1779, 1, p. 3.

361) *J. f. Math.* 56 (1859), p. 105.

362) *Ibid.* 57 (1860), p. 235.

363) *Leipz. Ber.* 1864, p. 44. Vgl. auch: *Baltzer*, *El. der Math.* 1, p. 189.

analoger *viergliedriger* Systeme gelangte *Jacobi*³⁶⁴) zu einer Verallgemeinerung des Kettenbruchalgorithmus, die sich auch auf beliebigvielligliedrige Systeme ausdehnen lässt³⁶⁵).

Schliesslich sei hier noch auf den Zusammenhang solcher rekurrenter Systeme mit der Theorie der *Differenzengleichungen*³⁶⁶) hingewiesen. Insbesondere genügen die A_v , B_v , also auch die *Euler'schen* und *Möbius'schen* Symbole einer linearen Differenzengleichung zweiter Ordnung³⁶⁷).

47. Näherungsbrucheigenschaften besonderer Kettenbrüche.

Die bisher betrachteten Eigenschaften der Kettenbrüche sind *rein formaler* Natur; sie bestehen völlig unabhängig von der besonderen Natur der a_v , b_v (unter denen man sich also statt beliebiger *reeller Zahlen* eventuell auch *complexe Zahlen* bzw. beliebige *Funktionen* denken kann). Eigenschaften anderer Art kommen zum Vorschein, wenn man die a_v , b_v spezialisiert. Insbesondere tritt der eigentümliche Charakter der Näherungsbrüche, welchem dieselben ihren Namen verdanken, erst hervor, wenn die a_v unter sich, desgl. die b_v unter sich (abgesehen von dem allemal irrelevanten b_0) *gleichbezeichnet* sind. Nimmt man durchweg $b_v > 0$ (was vermöge Gl. (80) keine Beschränkung der Allgemeinheit bedeutet), so bleiben folgende zwei Möglichkeiten:

I. $a_v > 0$. Aus Gl. (75), (77), (78) folgt dann unmittelbar, dass die A_v , B_v mit v *monoton zunehmen*, die $\frac{A_{2v-1}}{B_{2v-1}}$ eine *zunehmende*, die $\frac{A_{2v}}{B_{2v}}$ eine *abnehmende* Folge bilden, so dass also:

$$(87) \quad \frac{A_{2v-1}}{B_{2v-1}} < \frac{A_{2v+1}}{B_{2v+1}} < K_n < \frac{A_{2v+2}}{B_{2v+2}} < \frac{A_{2v}}{B_{2v}} \quad (1 \leq v < \frac{n}{2} - 1).^{368)}$$

II. $a_v < 0$ — wobei es wegen der Formulierung des folgenden

364) J. f. Math. 69 (1868), p. 29. Werke 6, p. 385. (Aus J.'s Nachlasse von *Heine* herausgegeben.) Vgl. *E. Fürstenau*, Wiesbaden (Gymm.-Progr. 1874. — Die fragliche Untersuchung ist neuerdings von *W. Fr. Meyer* erheblich vereinfacht und vervollständigt worden: Königsb. Ber. 1898, p. 1. Züricher Verh. (1898), p. 168.

365) S. die Schlussbem. einer anderen, der eben citierten unmittelbar vorangehenden Abh. von *Jacobi*: a. a. O. p. 28, bzw. 384.

366) Vgl. I E.

367) *Heine*, Kugelf. 1, p. 261.

368) Eine geometrische Deutung dieser Relation s. *Schlömilch*, Algebr. Anal. p. 268. Weitere Ausführung dieses Gedankens bei *Lieblein*, Z. f. Math. 12 (1887), p. 189; *F. Klein*, Gött. Nachr. 1895, p. 257. Andere geometrische Darstellung bei *M. Koppe*, Math. Ann. 29 (1887), p. 187. (Weiterbildung einer von *Poinsot*, J. de Math. 10 [1845], p. 50 herrührenden Methode.)

zweckmässig erscheint, $a_1 > 0$, $b_0 \geq 0$ anzunehmen³⁶⁹). Genügen so dann die b_ν noch der Bedingung:

$$(88) \quad b_\nu \geq |a_\nu| + 1 \quad (\nu \geq 1),$$

so sind die A_ν , B_ν und alle $\frac{A_\nu}{B_\nu}$ positiv und mit ν monoton zunehmend.

Definiert man ferner als ν^{ten} *Nebennäherungsbruch*³⁷⁰) den Wert des Kettenbruches:

$$(89) \quad \frac{A'_\nu}{B'_\nu} = b_0 + \frac{a_1}{|b_1|} + \cdots + \frac{a_{\nu-1}}{|b_{\nu-1}|} + \frac{a_\nu}{|b_\nu - 1|} \quad \left(= \frac{A_\nu - A_{\nu-1}}{B_\nu - B_{\nu-1}} \right),$$

so hat man stets $\frac{A'_\nu}{B'_\nu} > K_n$, und es bilden die $\frac{A'_\nu}{B'_\nu}$ eine im allgemeinen *monoton abnehmende* (nur an Stellen, wo gerade $b_\nu = |a_\nu| + 1$, *konstante*) Folge, so dass also statt Ungl. (87) hier die folgende erscheint:

$$(90) \quad \frac{A_\nu}{B_\nu} < \frac{A_{\nu+1}}{B_{\nu+1}} \leq K_n < \frac{A'_{\nu+1}}{B'_{\nu+1}} \leq \frac{A'_\nu}{B'_\nu} \quad (1 \leq \nu \leq n-1).$$

Charakteristische Beziehungen von ähnlicher Einfachheit finden bei den Näherungsbrüchen sonstiger allgemeiner Kettenbruchtypen nicht statt. Dagegen ergeben sich noch *spezifisch arithmetische* Eigenschaften³⁷¹), wenn die a_ν , b_ν ganze Zahlen sind³⁷²), namentlich wenn noch durchweg $a_\nu = \pm 1$.

Dem Typus I gehören die für $a_\nu = 1$ und positiv ganzzahlige b_ν resultierenden *regelmässigen* (auch: *einfachen* oder *gewöhnlichen*) Kettenbrüche an, deren spezielle Näherungsbrucheigenschaften den eigentlichen Anstoss zur Ausbildung der Lehre von den Kettenbrüchen ge-

369) Der Fall $a_1 < 0$, b_0 beliebig, ist ohne weiteres auf den im Text behandelten zurückzuführen.

370) Stern, von dem diese für die Beurteilung analoger *unendlicher* Kettenbrüche nützliche Bemerkung herrührt, bezeichnet die $\frac{A'_\nu}{B'_\nu}$ als *mittelbare Näherungsbrüche* (a. a. O. p. 168). Der Ausdruck *Nebennäherungsbrüche* wird sonst gewöhnlich in etwas weiterem Sinne gebraucht, nämlich für alle Brüche, welche aus $\frac{A_\nu}{B_\nu}$ entstehen, wenn man den letzten Teilnenner b_ν durch $b_\nu - k$ ($k = 1, 2, \dots$, soweit als $b_\nu - k > 0$) ersetzt. Dieselben spielen namentlich bei gewissen arithmetischen Betrachtungen über *regelmässige* Kettenbrüche eine Rolle und werden von Stern (a. a. O. p. 18) als *eingeschaltete Näherungsbrüche* bezeichnet. (Bei Lagrange, Oeuvres 2, p. 567: fractions secondaires; 7, p. 29: fractions intermédiaires.) Vgl. auch Stern, Algebr. Anal. p. 292. 305.

371) Vgl. I C 1.

372) Sind die a_ν , b_ν beliebige *rationale* Zahlen, so kann man den Kettenbr. mit Hilfe von Gl. (80) stets in einen äquivalenten *ganzzahligen* transformieren.

geben haben³⁷³). Für $a_r = -1$, $b_r \geq |a_r| + 1$, d. h. ≥ 2 ergeben sich dem Typus II (der „reduzierten Form“) angehörige, kaum minder einfach charakterisierte Kettenbrüche, die etwa als *reduziert-regelmässig* bezeichnet werden mögen³⁷⁴). Jede rationale (bezw. irrationale) Zahl A lässt sich auf eine *einzig Weise*³⁷⁵) durch einen begrenzten (bezw. unbegrenzt fortsetzbaren) *regelmässigen* oder auch *reduziert-regelmässigen* Kettenbruch darstellen. Setzt man: $A = b_0 + \frac{1}{r_1}$, $r_1 = b_1 + \frac{1}{r_2}$, u. s. f., so erscheint die *regelmässige*, bezw. *reduziert-regelmässige* Entwicklung, je nachdem man $\frac{1}{r_v}$ allemal dem Intervalle $(0, 1)$ oder $(0, -1)$ entnimmt³⁷⁶).

48. Konvergenz und Divergenz unendlicher Kettenbrüche.

Allgemeines Divergenzkriterium. Aus zwei unbegrenzten Zahlenfolgen (a_r) , (b_r) kann man, zunächst rein formal, einen „unendlichen“ (d. h. unbegrenzt fortsetzbaren) *Kettenbruch*³⁷⁷) bilden, der mit:

$$(91) \quad b_0 + \frac{a_1}{b_1} + \frac{a_2}{b_2} + \dots \quad \text{oder:} \quad \left[b_0; \frac{a_r}{b_r} \right]_1^\infty$$

373) Die Näherungsbrüche regelmässiger Kettenbrüche wurden zuerst von *Daniel Schöner* zur angenäherten Darstellung von Verhältnissen grosser Zahlen benützt (*Geometria practica* 1625 bezw. 1641). Der durch Ungl. (87) dargestellte Charakter der Näherungsbrüche und ihre *Irreduktibilität* bei *Huygens* (*Descriptio automati planetarii* — Datierung unbestimmt, erst mit seinem Nachlass 1698 veröffentlicht).

374) Eine besondere Benennung scheint sich bisher nicht eingebürgert zu haben.

375) Mit der Nebenbedingung, dass bei einem begrenzten *regelmässigen* Kettenbrüche das *letzte* Glied stets < 1 , bei einem *reduziert-regelmässigen* nicht $= -\frac{1}{2}$ zu nehmen ist.

376) Eine andere Art der Entwicklung, bei welcher $\frac{1}{r_v}$ stets dem Intervalle $\left(-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}\right)$ entnommen wird, also eine solche „nach nächsten Ganzen“, hat für einen besonderen Fall *C. Minnigerode* (*Gött. Nachr.* 1873, p. 160) und allgemein *A. Hurwitz* untersucht (*Acta math.* 12 [1889], p. 367). Vgl. auch *Hurwitz*, *Math. Ann.* 39 (1891), p. 281; 44 (1894), p. 429.

377) Als erstes Beispiel eines unendlichen Kettenbruches erscheint nächst der von *Cataldi* gegebenen Entwicklung von Quadratwurzeln (s. Nr. 9) die Beziehung: $\frac{4}{\pi} = \left[1, \frac{(2v-1)^2}{2} \right]_1^\infty$, welche *Lord Brouncker* (um 1659) auf unbekannte Weise aus der *Wallis'schen* Formel abgeleitet hat. (Einfachster Beweis von *Euler* durch Transform. der *Leibniz'schen* Reihe für $\frac{\pi}{4}$: *Opusc. analyt.* 2, p. 449. Im übrigen vgl. *G. Bauer*, *Münch. Abh. Cl. II* 11² [1872], p. 100.)

bezeichnet werden mag. Nennt man wiederum $K_n = \frac{A_n}{B_n}$ den Wert des betr. n -gliedrigen Kettenbruches, so heisst der *unendliche* Kettenbruch *konvergent* und K sein Wert, wenn $\lim K_n = K$; dagegen *eigentlich* oder *uneigentlich divergent* (im letzteren Falle auch *oscillierend*), wenn das entsprechende von der Zahlenfolge (K_v) gilt³⁷⁸⁾. Mit Hülfe von Gl. (77) hat man:

$$(92) \quad K_n = K_0 + \sum_1^n (K_v - K_{v-1}) = b_0 + \sum_1^n (-1)^{v-1} \cdot \frac{a_1 \cdots a_v}{B_{v-1} \cdot B_v},^{379)}$$

und daher:

$$(93) \quad \left[b_0; \frac{a_v}{b_v} \right]_1^\infty = b_0 + \sum_1^\infty (-1)^{v-1} \cdot \frac{a_1 \cdots a_v}{B_{v-1} \cdot B_v},^{380)}$$

falls die betreffende Reihe *konvergiert*, während andererseits die *Divergenz* dieser Reihe stets diejenige des Kettenbruches nach sich zieht. Im Gegensatz zu unendlichen *Reihen* oder *Produkten* können *konvergente Kettenbrüche* lediglich durch *Weglassung einer endlichen Anzahl von Anfangsgliedern* auch *divergent* werden und *umgekehrt*. Ich nenne Kettenbrüche, deren Verhalten durch solche Weglassungen *nicht* alteriert wird, *unbedingt* konvergent bzw. divergent. Darnach ist jeder *eigentlich divergente* Kettenbruch nur *bedingt divergent*; beginnt man ihn erst mit dem Gliede $\frac{a_2}{b_2}$, so muss er gegen den Wert $-a_1$ *konvergieren*.

Die Beziehung (92) bzw. (93) liefert ein einfaches und sehr allgemeines *Divergenz-Kriterium*. Ist nämlich der Kettenbruch in der *Hauptform* vorgelegt, etwa: $\left[q_0; \frac{1}{q_v} \right]_1^\infty$, so lautet die gleichgeltende Reihe: $q_0 + \sum_1^\infty (-1)^{v-1} \cdot (Q_{v-1} \cdot Q_v)^{-1}$, wenn Q_v den Nenner des v ten Näherungsbruches bezeichnet. Da aber offenbar

$$|Q_n| < \prod_1^n (1 + |q_v|),$$

so folgt, dass jene Reihe und somit auch der *Kettenbruch* allemal di-

378) Der Begriff der *Konvergenz* und *Divergenz* von *Kettenbrüchen* scheint erst von *Seidel* („Unters. über die Konv. und Div. der Kettenbr.“, Habil.-Schr., München 1846) hinlänglich präzisiert worden zu sein. *Stern* (a. a. O. 10, p. 364) rechnet die innerhalb endl. Grenzen *oscillierenden* Kettenbr. zu den *konvergenten* und hat diese Anschauung erst später modifiziert (a. a. O. 37 [1848], p. 255).

379) Mit angemessener Abänderung, wenn einzelne B_v verschwinden sollten.

380) Diese Beziehung schon bei *Euler*, *Petrop.* Comm. 9, p. 104.

vergiert, wenn $\sum |q_v|$ konvergiert³⁸¹). Andererseits lässt sich der ursprünglich betrachtete Kettenbruch mit Hilfe von Gl. (80) stets auf die obige Hauptform bringen, wobei sich ergibt: $q_0 = b_0$, $q_1 = \frac{b_1}{a_1}$ und für $v \geq 2$, $\mu \geq 1$:

$$(94) \quad q_v = c_v \cdot b_v, \quad c_{2\mu} = \frac{a_1 \cdot a_3 \cdots a_{2\mu-1}}{a_2 \cdot a_4 \cdots a_{2\mu}}, \quad c_{2\mu+1} = \frac{a_2 \cdot a_4 \cdots a_{2\mu}}{a_1 \cdot a_3 \cdots a_{2\mu+1}},$$

und somit *divergiert* der Kettenbruch, falls die *beiden* Reihen:

$$(95) \quad \sum \left| \frac{a_1 \cdot a_3 \cdots a_{2\mu-1}}{a_2 \cdot a_4 \cdots a_{2\mu}} \cdot b_{2\mu} \right|, \quad \sum \left| \frac{a_2 \cdot a_4 \cdots a_{2\mu}}{a_1 \cdot a_3 \cdots a_{2\mu+1}} \cdot \frac{b_{2\mu+1}}{a_{2\mu+1}} \right|$$

konvergieren. Die Untersuchung der letzteren kann dann mit Hilfe der Kriterien zweiter Art auf diejenige des Quotienten $\left| \frac{a_{v+2} \cdot b_v}{a_{v+1} \cdot b_{v+2}} \right|$ zurückgeführt werden.

49. Kettenbrüche mit positiven Gliedern. Ein Kettenbruch mit lauter *positiven* Gliedern: $\left[\frac{1}{q_v} \right]_1^\infty$ bzw. $\left[\frac{a_v}{b_v} \right]_1^\infty$ (wo: $q_v > 0$, $a_v > 0$, $b_v > 0$) kann vermöge der besonderen Eigenschaften seiner Näherungsbrüche (s. Ungl. (87)) nur *konvergieren* (in welchem Falle stets: $\left[\frac{1}{q_v} \right]_1^\infty < 1$, $\left[\frac{a_v}{b_v} \right]_1^\infty < \frac{a_1}{b_1}$), oder innerhalb *endlicher* Grenzen *oscillieren*. Die soeben angegebene *hinreichende Divergenz-Bedingung* erweist sich hier zugleich als *notwendig*; d. h. der Kettenbruch *konvergiert* und zwar stets *unbedingt*, wenn $\sum q_v$ bzw. *mindestens* eine der beiden Reihen (95) *divergiert*³⁸²). Da aber die *Divergenz* von $\sum q_v$ feststeht, wenn $\sum q_v \cdot q_{v+1}$ *divergiert* (jedoch *nicht* umgekehrt!), so liefert die *Divergenz* von $\sum q_v \cdot q_{v+1}$ bzw. diejenige von $\sum \frac{b_v \cdot b_{v+1}}{a_{v+1}}$ eine merklich einfachere *hinreichende* (aber *nicht notwendige*) Bedingung für die *Konvergenz* des Kettenbruches³⁸³). Bleibt dabei $\frac{b_v}{a_v}$ *über*, also $\frac{a_v}{b_v}$ *unter*

381) Für positive q_v bei Seidel a. a. O.; für beliebige q_v bei Stolz a. a. O. p. 279.

382) Zuerst von Seidel (a. a. O.) bewiesen; unabhängig auch von Stern, J. f. Math. 37 (1848), p. 269.

383) Schlömilch (Algebr. Anal. p. 290) giebt die von ihm aufgefundenene allzu enge Bedingung: $\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{b_v \cdot b_{v+1}}{a_{v+1}} > 0$ — mit dem unrichtigen Zusatz, dass man im Falle: $\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{b_v \cdot b_{v+1}}{a_{v+1}} = 0$ über die Beschaffenheit des Kettenbruches nichts aussagen könne. Andere Lehrbücher geben für diesen Fall die gleichfalls un-

einer endlichen Grenze, so genügt schon die *Divergenz* der noch einfacheren Reihe $\sum b_v$. Daraus folgt insbesondere, dass jeder *ganzzahlige* Kettenbruch $\left[\frac{a_v}{b_v}\right]_1^\infty$, falls $0 < a_v \leq b_v$, insbesondere also jeder *regelmässige konvergiert*. Sein Wert ist stets *irrational*³⁸⁴⁾ und < 1 . Über den mit Hilfe der Näherungsbrüche zu erzielenden Grad der Annäherung^{384a)} geben die Formeln (77), (78), (87) Aufschluss.

Ist dagegen $a_v > b_v$ und der Kettenbruch *konvergent* (was mit Hilfe der oben angegebenen Regeln in unendlich vielen Fällen wirklich festgestellt werden kann), so kann sein Wert auch *rational* sein³⁸⁵⁾, und man besitzt keine allgemeinen Kriterien, um seine etwaige *Irrationalität* zu beurteilen. Schon *Euler* hat bemerkt³⁸⁶⁾, dass der Kettenbruch $\left[\frac{m+v}{1+v}\right]_1^\infty$, welcher nach dem gesagten *irrational* ausfällt für $m=0$ und $m=1$,³⁸⁷⁾ einen *rationalen* Wert besitzt, wenn die ganze Zahl $m \geq 2$ ist. Analoges Verhalten zeigt der allgemeinere Kettenbruch $\left[\frac{m+v}{n+v}\right]_1^\infty$, dessen Wert nur für $m \leq n$ *irrational*, dagegen für $m \geq n+1$ *rational* ist³⁸⁸⁾.

50. Konvergente Kettenbrüche mit Gliedern beliebigen Vorzeichens. Ein Kettenbruch, dessen Teilzähler und Teilnenner beliebige Vorzeichen besitzen, kann mit Hilfe von Gl. (80) stets auf die Form gebracht werden: $\varepsilon_0 b_0 + \left[\frac{\varepsilon_v a_v}{b_v}\right]_1^\infty$, wo: $\varepsilon_v = \pm 1$, $a_v > 0$, $b_v > 0$. Ein Kettenbruch dieser letzteren Art ist *unbedingt konvergent*, wenn durchweg oder zum mindesten für $v \geq n$:

$$(96) \quad b_v \geq a_v + 1. \quad (\text{Vgl. Ungl. (88).}^{389)})$$

nötig eingeeengte Ergänzungsbedingung: $\sum \frac{b_v b_{v+1}}{a_{v+1} + b_v b_{v+1}}$ *divergent* (herührend von *F. Arndt*, Disqu. de fractionibus continuis, Sundiae 1845).

384) Nach *Legendre*; vgl. Nr. 9, Fussn. 59; Nr. 50, Fussn. 391.

384a) Vgl. *Koppe* a. a. O. p. 199. *Hurwitz*, Math. Ann. 39 (1891), p. 279.

385) Einen besonderen Fall dieser Art s. Fussn. 390.

386) Opusc. anal. 1, p. 85.

387) Er hat für $m=0$ bzw. $m=1$ die Werte: $\frac{1}{e-2} - 1$ bzw. $e - 2$.

388) *Euler* a. a. O. p. 103. *Stern* a. a. O. 11, p. 43 ff. Vgl. auch 18, p. 74. *G. Bauer*, Münch. Abh. 11², p. 109.

389) In dieser allgemeinen Form (auch für complexe ε_v , wo $|\varepsilon_v| = 1$) habe ich den Satz neuerdings bewiesen: Münch. Ber. 28 (1898), p. 312 (daselbst auch einige weitere Kriterienformen p. 319 ff.). — Für den besonderen Fall: $\varepsilon_v a_v = -1$ (die „reduzierte“ Form der Kettenbrüche) findet er sich bei *Seidel*, Münch. Abh. 2. Kl., 7² (1855), p. 582; für den etwas allgemeineren: $\varepsilon_v = -1$, $a_v > 0$ — bei *Stern*, Algebr. Anal. p. 301.

Dabei ist stets: $0 < \varepsilon_1 \cdot \left[\frac{\varepsilon_v a_v}{b_v} \right]_1^\infty < 1$, ausser wenn durchweg: $b_v = a_v + 1$, $\varepsilon_v = -1$ und $\sum a_1 a_2 \dots a_v$ *divergiert*, in welchem Falle der Wert 1 resultiert³⁹⁰). Sind die a_v, b_v ganze Zahlen, so ist der Wert dieses Kettenbruches *irrational*³⁹¹), sofern nicht die eben genannten Spezialbedingungen für $v \geq 1$ bzw. $v \geq n$ bestehen, in welchem Falle er $= 1$, bzw. ein rationaler ächter Bruch ist. In der durch Ungl. (96) charakterisierten Klasse *konvergenter* Kettenbrüche sind insbesondere die *reduziert-regelmässigen* (Nr. 47) und die von A. Hurwitz betrachteten Kettenbruchentwickelungen³⁹²) nach „nächstgelegenen Ganzen“ enthalten. Der Konvergenzgrad der ersteren kann mit Hinzuziehung der Nebennäherungsbrüche (Ungl. (90)) genauer beurteilt werden.

Im übrigen ist die Konvergenzbedingung (96) weit davon entfernt, eine *notwendige* zu sein. Seidel hat gezeigt, dass es unter den Kettenbrüchen von der Form $\left[-\frac{1}{q_v} \right]_1^\infty$ (welche nur für $q_v \geq 2$ als *reduziert-regelmässig* zu gelten haben) sowohl *konvergente*, als *divergente* giebt, falls $q_v < 2$, $\lim q_v = 2$,³⁹³) ja es giebt sogar *konvergente*, für welche $\lim q_v < 2$, z. B. $= \sqrt{2}$.³⁹⁴) Allgemeine Kriterien zur Beurteilung von Kettenbrüchen, welche *nicht* der Bedingung (96) genügen (abgesehen von solchen mit lauter positiven Gliedern) scheinen bisher nicht entdeckt worden zu sein.

51. Periodische Kettenbrüche. Bestimmtere Aussagen lassen sich noch bezüglich der speziellen Klasse der periodischen Kettenbrüche machen. Der Kettenbruch $\left[\frac{a_v}{b_v} \right]_1^\infty$ heisst *rein periodisch* mit der *m-gliedrigen Periode* $\left[\frac{a_v}{b_v} \right]_1^m$, wenn für jedes λ und für $\mu = 1, 2, \dots, m$:

390) Man hat also in diesem Falle: $-\left[\frac{a_v}{a_v + 1} \right]_1^\infty = 1$, dagegen $-1 = \frac{1}{s}$,

wenn $1 + \sum_{i=1}^{\infty} a_i a_2 \dots a_v = s$. Analog ist für $a_v > 1$: $\left[\frac{a_v}{a_v - 1} \right]_1^\infty = 1$ (Stern

Journ. f. Math. 11, p. 41).

391) Schon in dieser Allgemeinheit von Legendre (a. a. O.) ausgesprochen, aber nur insoweit bewiesen, als der Kettenbruch ohne weiteres als *konvergent* angesehen wird. Vgl. Pringsheim, Münch. Ber. 28 (1898), p. 326.

392) Nr. 47, Fussn. 376.

393) A. a. O., p. 585 ff. Der fragliche Kettenbruch ist z. B. *divergent* für $q_v = 2 - \frac{1}{v}$, *konvergent* für $q_v = 2 - \frac{1}{v^1 + q}$ ($q > 0$).

394) A. a. O. p. 595.

$$(97) \quad a_{m\lambda+\mu} = a_\mu, \quad b_{m\lambda+\mu} = b_\mu$$

(mit der selbstverständlichen Nebenbedingung, dass die Periode $\left[\frac{a_\nu}{b_\nu}\right]_1^m$ nicht schon in mehrere kleinere Perioden zerfällt). Ist nur der Kettenbruch $\left[\frac{a_\nu}{b_\nu}\right]_n^\infty$ ($n > 1$) *periodisch*, so heisst $\left[\frac{a_\nu}{b_\nu}\right]_1^\infty$ *gemischt-periodisch*. Für die Konvergenzuntersuchung genügt die Betrachtung eines *rein-periodischen* Kettenbruches. Falls nun der Kettenbruch $\left[\frac{a_\nu}{b_\nu}\right]_1^\infty$ mit der Periode $\left[\frac{a_\nu}{b_\nu}\right]_1^m$ überhaupt *konvergiert*, so bestimmt sich sein Wert x aus der Beziehung: $x = \frac{A_m + x \cdot A_{m-1}}{B_m + x \cdot B_{m-1}}$, also, wenn $|B_{m-1}| > 0$, aus der quadratischen Gleichung:

$$(98) \quad B_{m-1} \cdot x^2 + (B_m - A_{m-1})x - A_m = 0,$$

aus deren Natur dann umgekehrt die *Konvergenz* oder *Divergenz* des Kettenbruches erschlossen werden kann, soweit dieselbe nicht schon aus den früher angegebenen Kriterien hervorgeht. Als *notwendige* Bedingung für die *Konvergenz* des Kettenbruches ergibt sich bei *reellen* a_ν, b_ν ohne weiteres die *Realität* der Wurzeln x_1, x_2 von Gl. (98). Dieselbe ist auch *hinreichend* (und zwar hat man $x = x_1$), *wenn entweder* $x_1 = x_2$ *oder* x_1, x_2 *verschieden und zugleich:*

$$|B_m + x_1 B_{m-1}| > |B_m + x_2 B_{m-1}|, \quad |A_\nu - x_2 B_\nu| > 0 \\ (\nu = 0, 1, \dots (m-2), A_0 = 0, B_0 = 1).$$

In jedem anderen Falle *divergiert* der Kettenbruch; dies gilt insbesondere auch, wenn $B_{m-1} = 0$.³⁹⁵) Sind bei verschiedenen x_1, x_2 die obigen *Konvergenz*-Bedingungen in soweit erfüllt, dass nur für einen oder mehrere *bestimmte* Werte $\nu = p$: $A_\nu - x_2 B_\nu = 0$, so *oscilliert* der Kettenbruch in der Weise, dass: $\lim_{\lambda \rightarrow \infty} K_{m\lambda+p} = x_2$, im übrigen aber $\lim_{\nu \rightarrow \infty} K_\nu = x_1$ wird³⁹⁶).

Unter den periodischen Kettenbrüchen nehmen wiederum die *regelmässigen*, deren *Konvergenz* nach Nr. 49 *a priori* feststeht, eine bevorzugte Stellung ein³⁹⁷). Im Gegensatz zu der (im wesentlichen

395) Die vorstehenden Bedingungen rühren von *Stolz* her (Innsbr. Ber. 1886, p. 1. Allg. Arithm. 2, p. 302). Dieselben gelten auch für komplexe a_ν, b_ν (in welchem Falle natürlich die *Realität* von x_1, x_2 als *notwendige* Konvergenzbedingung wegfällt). Ein weiteres *Divergenz*-Kriterium giebt *Stolz*: Innsbr. Ber. 1887/88, p. 1. Vgl. auch: *Mansion*, Mathesis 6 (1886), p. 80.

396) *T. N. Thiele*, Tidskr. (4) 3 (1881), p. 70.

397) Eine etwas allgemeinere Gattung, bei welcher an Stelle des Zählers 1 immer eine *beliebige* konstante ganze Zahl steht, ist von *E. de Jonquières* aus-

schon bei *Cataldi* vorhandenen) *Euler'schen* Entwicklungsform³⁹⁸):

$$(99) \quad x = b + \frac{a}{|b|} + \frac{a}{|b|} + \dots, \text{ wo: } x^2 - bx - a = 0,$$

hat *Lagrange* die *regelmässige* Entwicklung³⁹⁹):

$$(100) \quad x = b_0 + \frac{1}{|b_1|} + \frac{1}{|b_0|} + \frac{1}{|b_1|} + \dots, \text{ wo: } b_1 x^2 - b_0 b_1 x - b_0 = 0,$$

und (wegen der zuweilen damit verbundenen Abkürzung der Rechnung⁴⁰⁰) allenfalls eine solche von der Form: $\left[b_0; \pm \frac{1}{b_v} \right]_1^\infty$ als einzig wertvolle hingestellt⁴⁰¹). Von ihm rührt der Fundamentalsatz, dass sich jede reelle Wurzel einer quadratischen Gleichung mit reellen ganzzahligen Koeffizienten durch einen allemal *periodischen regelmässigen* Kettenbruch darstellen lässt⁴⁰²). Den einfachen Zusammenhang zwischen den Entwicklungen der beiden verschiedenen Wurzeln hat *Galois* zuerst festgestellt⁴⁰³); die eine Periode ist genau die inverse der anderen⁴⁰⁴).

fürhlich betrachtet worden: Par. C. R. 96 (1883), p. 568. 694. 832. 1020. 1129. 1210. 1297. 1351. 1420. 1490. 1571. 1721. Insbesondere werden die Periodengesetze solcher allgemeiner Kettenbruchentwicklungen für bestimmt klassifizierte quadratische Irrationalitäten untersucht und der Gang der Näherungsbrüche mit demjenigen der entsprechenden *regelmässigen* Entwicklungen verglichen.

398) *Introductio* P. I, p. 315. Der Kettenbruch wird nur dann *regelmässig*, wenn gerade $a = 1$. — *Petrop.* *Novi comment.* 11 (1765) giebt *Euler* die Entwicklung von \sqrt{g} (g eine beliebige natürliche Zahl) in einen *regelmässigen* Kettenbruch. — Die Übertragung der eingliedrig-periodischen *Euler'schen* Entwicklungsform (99) auf den Fall einer *beliebigen* quadratischen Gleichung mit ganzzahligen Koeffizienten und reellen Wurzeln findet sich (anonym): *Gergonne Ann.* 14 (1823), p. 329.

399) *Oeuvres* 2, p. 594.

400) *Ibid.* p. 622.

401) In den Zusätzen zu *Euler's Algebra* sagt er geradezu folgendes (*Oeuvres* 7, p. 8): „Nous ne considérons ici que les fractions continues où les numérateurs sont égaux à l'unité . . . car celles-ci sont, à proprement parler, les seules qui soient d'un grand usage dans l'Analyse, les autres n'étant presque que de pure curiosité.“

402) *Oeuvres* 2, p. 609. — Einfachere Beweise geben: *M. Charres*, *Darboux* (2) 1 (1877), p. 41, *Hermite*, *ibid.* 9 (1885), p. 11, *W. Veltmann*, *Z. f. Math.* 32 (1887), p. 210). — Eine zusammenhängende Darstellung der Lehre von den *regelmässigen* Kettenbruchentwicklungen quadratischer Irrationalitäten: *Serret*, *Cours d'Algèbre*, Paris 1885, 1, Chap. II.

403) *Gergonne Ann.* 19 (1828), p. 294. Vgl. auch *Hermite*, *Veltmann* a. a. O. — Der entsprechende Satz für *reduziert-regelmässige* Entwicklungen bei *Möbius*, *Werke* 4, p. 526.

404) Eine ähnliche Art des Zusammenhanges ergibt sich auch bei der *Hurwitz'schen* Entwicklung nach nächsten Ganzen: *Acta math.* 12, p. 399.

52. Transformation unendlicher Kettenbrüche. Neben der in Nr. 45 erwähnten Transformation eines Kettenbruches in einen *äquivalenten*, bei welcher der Wert *sämtlicher Näherungsbrüche ungeändert* bleibt, giebt es noch unendlich viele andere⁴⁰⁵⁾, bei denen dies *nur teilweise* zutrifft; letzteres ist eo ipso allemal dann der Fall, wenn der transformierte Kettenbruch eine *grössere* oder *geringere Gliederzahl* enthält, als der ursprüngliche. Es liegt auf der Hand, dass bei Transformationen der gedachten Art ein *konvergenter* Kettenbruch sehr wohl *divergent* werden kann *und umgekehrt*⁴⁰⁶⁾ (analog wie bei entsprechenden Umformungen unendlicher Reihen⁴⁰⁷⁾). Immerhin können dieselben mit der nötigen Vorsicht bisweilen zur Verwandlung *konvergenter* Kettenbrüche in *schneller konvergierende*⁴⁰⁸⁾ und sogar zur wirklichen *Wertbestimmung*⁴⁰⁹⁾ („Reduktion“, „Darstellung in geschlossener Form“, häufig auch — nicht recht passend — als „Summation“ bezeichnet) oder zur Ableitung von Relationen zwischen den Werten *verschiedener* konvergenter Kettenbrüche dienlich sein⁴¹⁰⁾.

53. Umformung einer unendlichen Reihe in einen äquivalenten Kettenbruch. Die Umkehrung der Gleichung (93) liefert die Verwandlung einer *unendlichen Reihe* $\sum_1^{\infty} (-1)^{v-1} \cdot c_v$ in einen *äquivalenten Kettenbruch* $\left[\frac{a_v}{b_v} \right]_1^{\infty}$; dabei stimmt nicht nur der Wert des *unendlichen Kettenbruches* mit der *Summe der Reihe*, sondern auch der

405) Euler, Comment. Petrop. 9, p. 127; Opusc. analyt. 1, p. 101. Stern a. a. O. 10, p. 157. Seidel a. a. O. p. 567. Möbius a. a. O. p. 518. O. Heiler-mann, Z. f. Math. 5 (1860), p. 362. — Die Transformation des Kettenbruches $\left[\frac{a_v}{b_v} \right]_1^{\infty}$, wo $b_v \geq |a_v| + 1$, in einen positiv-gliedrigen bei Heine, Kugelf. 1, p. 265; diejenige eines *regelmässigen* in einen solchen *nach nächsten Ganzen* bei Hurwitz, Zürich. Naturf. Ges. 41 (1896), p. 62.

406) Vgl. Seidel a. a. O. p. 569.

407) Ist z. B. $\sum c_v$ konvergent und $a_v = c_v + (-1)^v$, so *divergiert* $\sum a_v$, während $\sum (a_{2v-1} + a_{2v})$ konvergiert.

408) Vgl. Möbius a. a. O.

409) Stern a. a. O. 11, p. 43.

410) Dahin gehört z. B. die schon von Wallis (Arithm. inf. Prop. 191: Opera 1, p. 470) behufs Ableitung des Brouncker'schen Kettenbruches für $\frac{4}{\pi}$ (Nr. 48, Fussn. 377) aufgestellte, aber nicht ausreichend bewiesene Formel:

$$\left[a - 1, \frac{(2v-1)^2}{2(a-1)} \right]_1^{\infty} \cdot \left[a + 1, \frac{2v-1}{2(a+1)} \right]_1^{\infty} = a^2$$

und deren Verallgemeinerungen; vgl. G. Bauer a. a. O. p. 113.

Wert jedes einzelnen *Näherungsbruches* $\frac{A_n}{B_n}$ mit demjenigen der entsprechenden *Partialsumme* $\sum_1^n (-1)^v \cdot c_v$ überein, so dass also durch die *Konvergenz* der *Reihe* auch diejenige des *Kettenbruches* von vornherein gesichert ist. Die zur Bestimmung der a_v, b_v lediglich erforderliche Auflösung der Gleichungen:

$$\left[\frac{a_v}{b_v} \right]_1^n = \sum_1^n (-1)^{v-1} \cdot c_v \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

gestattet entweder die a_v oder die b_v völlig *willkürlich* anzunehmen (mit angemessenem Ausschluss von 0 — cf. Gl. (80), (81)). Lässt man etwa die b_v *beliebig*, so ergibt sich, wie schon *Euler gefunden* hat⁴¹¹⁾:

$$(101) \quad \left\{ \begin{array}{l} a_1 = c_1 b_1, \quad a_2 = \frac{c_2 b_1 b_2}{c_1 - c_2} \\ \text{und für } v \geq 3: \quad a_v = \frac{c_{v-2} \cdot c_v \cdot b_{v-1} \cdot b_v}{(c_{v-2} - c_{v-1})(c_{v-1} - c_v)}. \end{array} \right.$$

Werden die b_v speziell so gewählt, dass die Brüche in den Teilzählern wegfallen, d. h. setzt man: $b_1 = 1$ und für $v \geq 2$: $b_v = c_{v-1} - c_v$, so ergibt sich die *Euler'sche Hauptformel*⁴¹²⁾:

$$(102) \quad \sum_1^\infty (-1)^{v-1} \cdot c_v = \frac{c_1}{1} + \frac{c_2}{c_1 - c_2} + \dots + \frac{c_{v-2} \cdot c_v}{c_{v-1} - c_v} + \dots,$$

aus der unmittelbar noch die folgenden beiden resultieren⁴¹³⁾:

$$(103) \quad \sum_1^\infty (-1)^{v-1} \frac{p_v}{q_v} \cdot \left(\frac{x}{y} \right)^v = \frac{p_1 x}{q_1 y} + \frac{p_2 q_1^2 x y}{p_1 q_2 y - p_2 q_1 x} + \dots$$

$$+ \frac{p_{v-2} p_v q_{v-1}^2 x y}{p_{v-1} q_v y - p_v q_{v-1} x} + \dots,$$

$$(104) \quad \sum_1^\infty (-1)^{v-1} \frac{p_1 \cdots p_v}{q_1 \cdots q_v} \cdot \left(\frac{x}{y} \right)^v = \frac{p_1 x}{q_1 y} + \frac{p_2 q_1 x y}{q_2 y - p_2 x} + \dots$$

$$+ \frac{p_v q_{v-1} x y}{q_v y - p_v x} + \dots.$$

Die letzteren⁴¹³⁾ liefern insbesondere für $y = 1$ bzw. $x = 1$ die Entwicklung von steigenden bzw. fallenden *Potenzreihen* in *äquivalente*

411) Introductio 1, p. 302.

412) L. c. p. 303, 309, 310.

413) Dieselben enthalten u. a. alle jene Spezialentwicklungen, welche *Euler*, ohne auf diese allgemeinen Formeln zu rekurriren, in einer eigenen Arbeit über die Verwandlung von Reihen in Kettenbrüche umständlich abgeleitet hat (Opusc. anal. 2, p. 138—177).

Kettenbrüche, deren Teilzähler und Teilnenner durchweg *ganze lineare* Funktionen von x bzw. y sind.

54. Anderweitige Kettenbruchentwickelungen unendlicher Reihen. Bei der eben betrachteten, auf der für jedes n geforderten Beziehung: $s_n - \frac{A_n}{B_n} = 0$ beruhenden Kettenbruchtransformation der Reihe $s = \lim s_n$, erscheint der resultierende Kettenbruch nur in soweit willkürlich, als er nach Massgabe von Gl. (80) auch durch jeden ihm *äquivalenten* ersetzt werden kann. Daneben sind aber noch unendlich viele andere Kettenbruchentwickelungen denkbar, bei denen lediglich $\lim_{n=\infty} \left(s_n - \frac{A_n}{B_n} \right) = 0$. Setzt man nämlich:

$$(105) \quad s = b_0 + \frac{a_1}{r_1}, \quad r_1 = b_1 + \frac{a_2}{r_2}, \quad \dots \quad r_n = b_n + \frac{a_{n+1}}{r_{n+1}},$$

so kann man offenbar bei willkürlicher Annahme der a_v, b_v die r_v , insbesondere schliesslich r_{n+1} passend bestimmen und erhält auf diese Weise⁴¹⁴⁾:

$$(106) \quad s = b_0 + \frac{a_1}{|b_1|} + \frac{a_2}{|b_2|} + \dots + \frac{a_n}{|b_n|} + \frac{a_{n+1}}{|r_{n+1}|}.$$

Bei unbegrenzter Fortsetzung dieses Verfahrens ergibt sich eine Kettenbruchentwickelung von der Form $s = \left[b_0; \frac{a_v}{b_v} \right]_1^\infty$, sobald der letztere Kettenbruch *konvergiert* und ausserdem $\lim \left(s - \frac{A_n}{B_n} \right) = 0$ wird⁴¹⁵⁾. Erscheint hierdurch die Willkürlichkeit bezüglich der Auswahl der a_v, b_v von vornherein erheblich eingeschränkt, so ergeben sich weitere Einschränkungen aus der Bemerkung, dass Kettenbruchentwickelungen mit ausgeprägten arithmetischen oder analytischen Eigenschaften auf dem gedachten Wege offenbar nur zu stande kommen werden, wenn die Art der successiven *Annäherung* der $\frac{A_v}{B_v}$ an

414) Dabei könnte offenbar s *jede beliebige Zahl* oder *Funktion* bedeuten, d. h. man kann jedes beliebige s durch einen Kettenbruch darstellen, dessen erste n Glieder willkürlich vorgeschrieben sind.

415) Die blosse *Konvergenz* des Kettenbruches würde zur Erschliessung der Beziehung $s = \left[b_0; \frac{a_v}{b_v} \right]$ nicht genügen (ähnlich wie bei der *Taylor'schen* Reihe). Dagegen involviert umgekehrt die zweite Bedingung (die sich folgendermassen schreiben lässt: $\lim \left\{ \frac{r_{n+1}A_n + a_{n+1}A_{n-1}}{r_{n+1}B_n + a_{n+1}B_{n-1}} - \frac{A_n}{B_n} \right\} = 0$) offenbar die *Konvergenz* des Kettenbruches.

den Grenzwert s in irgend welcher gesetzmässigen Weise genauer präzisiert wird. Im übrigen ist die angedeutete Methode bisher lediglich zur Ableitung gewisser *spezieller* Kettenbruchtypen für *Potenzreihen* oder *Quotienten zweier Potenzreihen* verwertet worden⁴¹⁶⁾.

55. Kettenbrüche für Potenzreihen und Potenzreihenquotienten. *Lambert*⁴¹⁷⁾ hat das durch Gl. (105) charakterisierte Entwicklungsverfahren (d. h. ein successives Divisionsverfahren nach Art der *Euklidischen* Methode zur Aufsuchung des grössten Gemeinteilers) auf den Quotienten $\tan x = \frac{s}{s'}$

$$\left(\text{wo: } s = \sum_{\nu=0}^{\infty} (-1)^{\nu} \cdot \frac{x^{2\nu+1}}{(2\nu+1)!}, \quad s' = \sum_{\nu=0}^{\infty} (-1)^{\nu} \cdot \frac{x^{2\nu}}{(2\nu)!} \right)$$

in der Weise angewendet, dass er setzt: $b_0 = 0$, $a_1 = 1$, im übrigen: $a_{\nu} = -1$, $b_{\nu} = (2\nu - 1) \cdot x^{-1}$, so dass sich ergibt:

$$(107) \quad \tan x = - \left[- \frac{1}{(2\nu - 1) \cdot x^{-1}} \right]_1^{\infty} = - \frac{1}{x} \cdot \left[- \frac{x^2}{2\nu - 1} \right]_1^{\infty}$$

und analog⁴¹⁸⁾:

$$(108) \quad \frac{e^x - 1}{e^x + 1} = \left[\frac{1}{(4\nu - 2) \cdot x^{-1}} \right]_1^{\infty} = \frac{1}{x} \cdot \left[\frac{x^2}{4\nu - 2} \right]_1^{\infty}.$$

Als eine für die damalige Zeit ausserordentlich bemerkenswerte Leistung ist hervorzuheben, dass *Lambert* sich keineswegs mit der *formalen Ableitung* der obigen Entwicklungen begnügt hat, sondern durch eine zwar etwas umständliche, aber durchaus strenge Unter-

416) Ein brauchbares *allgemeines* Prinzip für die genauere Präzisierung der unendlich vielen einer *Potenzreihe* zuzuordnenden Kettenbruchentwickelungen hat *R. Padé* angegeben (Sur la représentation approchée d'une fonction par des fractions rationnelles. Thèse de Doctorat. Paris 1892). Vgl. Nr. 40.

417) Hist. Acad. de Berlin, Année 1761 (1768), p. 268.

418) A. a. O. p. 307. — Der Kettenbruch (108) findet sich im wesentlichen auch bei *Euler* und zwar schon in der Kettenbruchabhandlung von 1737 (Petrop. Comment. 9, p. 132); späterhin (z. B. Opusc. anal. 2, p. 216) auch der Kettenbruch (107). *Euler* gewinnt aber die fraglichen Beziehungen nicht durch *Entwickelung* jener Quotienten in Kettenbrüche, sondern gerade umgekehrt durch *Reduktion* einer bestimmten Klasse von Kettenbrüchen mit Hilfe eines Integrationsverfahrens (vgl. Nr. 9 und Münch. Sitzber. 1898, p. 327). Die arithmetischen Eigenschaften jener Klasse von Kettenbrüchen (bei denen nämlich die Teilnenner *arithmetische Reihen* bilden) sind neuerdings von *A. Hurwitz* untersucht worden, Zürich. Naturf. Ges. 41 (1896), p. 34. — Auch *Lagrange* hat die *Lambert'schen* Kettenbrüche und einige ähnliche durch Integration von Differentialgleichungen abgeleitet, Berl. Mém. 1776, p. 236 (Oeuvres 4, p. 320).

suchung von $\lim \frac{A_n}{B_n}$ wirklich deren *Gültigkeit* beweist⁴¹⁹). Bei *Legendre*⁴²⁰), welcher das *Lambert'sche Divisions-Verfahren* durch ein kürzeres *rekursorisches* ersetzt, findet sich von einem derartigen Beweise keine Spur; auch nicht einmal bei *Gauss*⁴²¹), der die *Legendre'sche Methode* auf Quotienten von der Form: $\frac{F(\alpha, \beta + 1, \gamma + 1, x)}{F(\alpha, \beta, \gamma, x)}$ und ähnliche übertragen hat; dabei bezeichnet das Symbol *F* die sog. *hypergeometrische Reihe*:

$$(109) \quad F(\alpha, \beta, \gamma, x) = 1 + \frac{\alpha \cdot \beta}{1 \cdot \gamma} x + \frac{\alpha(\alpha+1) \cdot \beta(\beta+1)}{1 \cdot 2 \cdot \gamma(\gamma+1)} x^2 \dots$$

Durch die Annahme $\beta = 0$ ergibt sich sodann, wegen $F(\alpha, 0, \gamma, x) = 1$, für die Reihe:

$$(110) \quad F(\alpha, 1, \gamma, x) = 1 + \frac{\alpha}{\gamma} x + \frac{\alpha(\alpha+1)}{\gamma(\gamma+1)} \cdot x^2 + \dots$$

eine Kettenbruchentwicklung von der Form⁴²²):

$$(111) \quad 1 - \frac{a_1 x}{1} - \frac{a_2 x}{1} - \dots, \quad \text{wo: } a_1 = \frac{\alpha}{\gamma}, \quad a_2 = \frac{\gamma - \alpha}{\gamma(\gamma+1)},$$

$$a_{2\nu+1} = \frac{(\alpha + \nu)(\gamma + \nu - \alpha)}{(\gamma + 2\nu - 1)(\gamma + 2\nu)}, \quad a_{2\nu+2} = \frac{(\nu+1)(\gamma + \nu - \alpha)}{(\gamma + 2\nu)(\gamma + 2\nu + 1)}.$$

Ein allgemeiner Konvergenz- und Gültigkeitsbeweis dieser Entwicklungen ist durch *Heine's* Untersuchungen über das Bildungsgesetz der betreffenden *Näherungsbrüche*⁴²³) vorbereitet und von

419) Vgl. Münch. Ber. 28 (1898), p. 331. Auf dem *Lambert'schen Divisionsverfahren* beruhen auch die Kettenbruchentwicklungen von *Bret* (*Gergonne Ann.* 9 [1818], p. 45) und *Gergonne* (*ibid.* p. 263). Letzterer behandelt die der *Gauss'schen Reihe* (110) verwandte *Stainville'sche* (*ibid.* p. 229):

$$f(\alpha, \gamma) = 1 + \frac{\alpha}{1} \cdot x + \frac{\alpha \cdot (\alpha + \gamma)}{1 \cdot 2} \cdot x^2 + \frac{\alpha(\alpha + \gamma)(\alpha + 2\gamma)}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot x^3 + \dots$$

und gewinnt u. a. vermöge der Relation: $f(\alpha, \gamma) \cdot f(\beta, \gamma) = f(\alpha + \beta, \gamma)$ verschiedene merkwürdige Beziehungen für Produkte, Potenzen und Quotienten von Kettenbrüchen.

420) *Élém. de Géom.* Note IV.

421) *Disquis. gen. circa seriem inf.* 1812 (Werke 3, p. 134).

422) Dieselbe enthält die Kettenbruchentwicklungen für $(1+x)^m$, $\lg(1+x)$, e^x u. a. als spezielle Fälle, während der allgemeinere Fall $\frac{F(\alpha, \beta + 1, \gamma + 1, x)}{F(\alpha, \beta, \gamma, x)}$ u. a. die *Lambert'schen Kettenbrüche* liefert.

423) *J. f. Math.* 34 (1847), p. 301; 57 (1860), p. 231. *Heine* dehnt zugleich die Untersuchung auf die von ihm eingeführte (a. a. O. 32 [1846], p. 210) *verallgemeinerte hypergeometrische Reihe* aus:

$$\varphi(\alpha, \beta, \gamma, q, x) = 1 + \frac{(q^\alpha - 1)(q^\beta - 1)}{(q - 1)(q^\gamma - 1)} x + \frac{(q^\alpha - 1)(q^{\alpha+1} - 1)(q^\beta - 1)(q^{\beta+1} - 1)}{(q - 1)(q^2 - 1)(q^\gamma - 1)(q^{\gamma+1} - 1)} x^2 + \dots,$$

W. Thomé durch direkte Bestimmung von $\lim \frac{A_n}{B_n}$ wirklich geliefert worden⁴²⁴). Die Skizze eines anderen durchaus funktionentheoretischen Beweises hat sich in *Riemann's* Nachlasse vorgefunden⁴²⁵). Elementare Beweise für besondere Fälle geben *Stern*⁴²⁶) und (besser) *Schlämilch*⁴²⁷) in ihren Lehrbüchern.

Die allgemeinere Aufgabe, eine beliebige Potenzreihe $\sum_0^\infty c_\nu x^\nu$, deren reziproken Wert oder den Quotienten zweier solcher Potenzreihen in einen Kettenbruch von der Form: $\left[b_0; \frac{x}{b_1} \right]_1^\infty$ (wo b_0, b_ν von x unabhängig) zu entwickeln, ist von *Stern*⁴²⁸) und mit besserem Erfolge von *O. Heilermann*⁴²⁹) behandelt worden. Letzterer giebt auch für den Quotienten von $\sum_0^\infty c_\nu x^{-\nu}$, $\sum_0^\infty d_\nu x^{-\nu}$ eine Darstellung von der Form: $\left[b_0; -\frac{a_\nu}{x+b_\nu} \right]_1^\infty$.⁴³⁰) Beide Arten von Entwicklungen sind (ähnlich wie die regelmässige einer Irrationalzahl) nur auf eine einzige Weise möglich. Ihren allgemeinen Charakter und gegenseitigen Zusammenhang hat *Heine* genauer festgestellt⁴³¹).

(NB. Im vorstehenden wurden fast ausschliesslich solche Arbeiten

welche für $\lim q = 1$ in die *Gauss'sche* übergeht. — Vgl. auch: Kugelf. 1, p. 280. *J. Thomae*, J. f. Math. 70 (1869), p. 278.

424) Für den besonderen Fall (110), (111): J. f. Math. 66 (1866), p. 322; für den allgemeineren des Reihenquotienten: ibid. 67 (1867), p. 299. Die Kettenbrüche konvergieren für alle x mit Ausschluss des reellen Intervalles $(1, \infty)$ und stellen die durch die Reihen definierte Funktion bzw. deren analytische Fortsetzung dar.

425) Werke p. 400. Der auf complexer Integration beruhende Beweis ist vom Bearbeiter dieses Fragments *H. A. Schwarz* einigermassen ergänzt worden.

426) Algebr. Anal. p. 467.

427) Algebr. Anal. p. 321. Vgl. auch *Stolz* 2, p. 310.

428) A. a. O. 10, p. 245.

429) Ibid. 33 (1846), p. 174. *Stern* giebt nur eine *Rekursionsformel*, *Heilermann* dagegen eine *independent* Darstellung der b_ν . Beide haben auch das um-

gekehrte Problem (Umformung von $\left[b_0; \frac{x}{b_1} \right]_1^\infty$ in $\sum_0^\infty c_\nu x^\nu$) behandelt: a. a. O. 18 (1838), p. 69; 46 (1853), p. 88.

430) Der Fall einer einzigen Reihe $\sum_0^\infty c_\nu x^{-\nu}$ bei *Herm. Hankel*, Z. f. Math. 7 (1862), p. 338; und *T. J. Stieltjes*, Toul. Ann. 3 (1889), p. 1.

431) Kugelf. 1, p. 268.

berücksichtigt, welche im wesentlichen mit *formalen* Methoden operieren. Die weitere Ausbildung der Beziehungen zwischen Reihen und Kettenbrüchen, sowie der entsprechenden Konvergenzbetrachtungen gehört, wie schon gelegentlich der *Gauss'schen* Reihe hervortrat, der Funktionentheorie an.)

56. Beziehungen zwischen unendlichen Kettenbrüchen und Produkten. Die Verwandlung eines unendlichen *Produktes* in einen äquivalenten Kettenbruch — und umgekehrt — kann entweder mittelst Durchganges durch die entsprechende *Reihe* oder auch *direkt* bewerkstelligt werden. Beide Methoden sind von *Stern* diskutiert worden⁴³²). Setzt man:

$$(112) \quad \prod_1^n \frac{p_v}{q_v} = \left[\frac{a_v}{b_v} \right]_1^n = \frac{A_n}{B_n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

so ergibt sich:

$$(113) \quad \frac{a_1}{b_1} = 1, \quad \frac{a_2}{b_2} = -\frac{p_1 - q_1}{p_1}, \quad \frac{a_3}{b_3} = -\frac{(p_2 - q_2)p_1 q_1}{p_1 p_2 - q_1 q_2},$$

$$\frac{a_{v+2}}{b_{v+2}} = -\frac{(p_{v-1} - q_{v-1})(p_{v+1} - q_{v+1}) \cdot p_v q_v}{p_v p_{v+1} - q_v q_{v+1}} \quad (v \geq 2),$$

und hieraus die Entwicklung von $\prod_1^\infty \frac{p_v}{q_v}$ in einen konvergenten Kettenbruch, falls das Produkt selbst *konvergiert*. Da

$$\left(\prod \frac{p_v}{q_v} \right)^m = \prod \frac{p_v^m}{q_v^m},$$

so besitzt diese Gattung von Kettenbrüchen die merkwürdige Eigenschaft, dass deren m^{te} Potenz wiederum als Kettenbruch von der gleichen Form dargestellt werden kann⁴³³).

Umgekehrt ergibt sich aus der Identität:

$$(114) \quad \frac{A_n}{B_n} = \frac{A_1}{B_1} \cdot \prod_1^{n-1} \frac{A_{v+1} \cdot B_v}{A_v \cdot B_{v+1}}$$

die konvergente Produktentwicklung:

$$(115) \quad \left[\frac{a_v}{b_v} \right]_1^\infty = \prod_1^\infty \frac{A_{v+1} \cdot B_v}{A_v \cdot B_{v+1}},$$

432) A. a. O. 10, p. 266. Algebr. Anal. p. 321.

433) Man kennt keinen allgemeinen Satz über die Darstellung von Kettenbruchsummen, -produkten oder -potenzen. Über einige besondere Fälle vgl. Nr. 52, Fussn. 410; Nr. 55, Fussn. 419.

falls der betreffende Kettenbruch *konvergiert*. Mit Hülfe dieser Formel findet Stern u. a. aus Kettenbruchentwickelungen für e , $\frac{e}{e-1}$ eigentümliche Produktdarstellungen (nach Art der Wallis'schen Formel)⁴³⁴).

57. Aufsteigende Kettenbrüche. Setzt man:

$$(116) \quad K^{(n)} = \frac{a_1 + r_1}{b_1}, \quad r_1 = \frac{a_2 + r_2}{b_2}, \quad \dots$$

$$r_{n-2} = \frac{a_{n-1} + r_{n-1}}{b_{n-1}}, \quad r_{n-1} = \frac{a_n}{b_n},$$

so entsteht durch Elimination der r , ein sog. n -gliedriger *aufsteigender Kettenbruch*:

$$(117) \quad K^{(n)} = \left\{ \frac{a_v}{b_v} \right\}_1^n = \frac{a_1 + \frac{a_2}{b_2} + \dots + \frac{a_n}{b_n}}{b_1}.$$

Da andererseits, wie unmittelbar erkannt wird:

$$(118) \quad \left\{ \frac{a_v}{b_v} \right\}_1^n = \frac{a_1}{b_1} + \frac{a_2}{b_1 b_2} + \dots + \frac{a_n}{b_1 b_2 \dots b_n},$$

so kann man einen solchen aufsteigenden Kettenbruch von vornherein durch dieses einfache Aggregat bzw., im Falle $\lim n = \infty$, durch die betreffende unendliche Reihe ersetzen⁴³⁵). Von bedeutenderen Mathematikern haben sich nur Lambert⁴³⁶) und Lagrange⁴³⁷) gelegentlich mit dieser Gattung von Ausdrücken beschäftigt. Letzterer hat insbesondere auf deren Zusammenhang mit den gewöhnlichen Kettenbrüchen aufmerksam gemacht, wobei es ihm (wie auch den späteren Bearbeitern dieser Theorie) entgangen zu sein scheint, dass dieser Zusammenhang schon vollständig durch die Euler'sche Formel (104) festgestellt erscheint. Die letztere (welche ja auch gilt, wenn man n statt ∞ setzt) liefert unmittelbar die Beziehung:

$$(119) \quad \left\{ \frac{a_v}{b_v} \right\}_1^n = \frac{a_1}{b_1} - \frac{a_2 b_1}{|a_1 b_2 + a_2|} - \dots - \frac{a_{v-2} a_v b_{v-1}}{|a_{v-1} b_v + a_v|} - \dots - \frac{a_{n-2} a_n b_{n-1}}{|a_{n-1} b_n + a_n|},$$

434) Vgl. auch Nr. 44, Fussn. 316.

435) Darnach können umgekehrt die endlichen oder unendlichen systematischen Brüche, die Potenzreihen für e^a , $\cos a$, $\sin a$, ferner die in Nr. 10 erwähnten Reihendarstellungen der rationalen und irrationalen Zahlen auch als aufsteigende Kettenbrüche betrachtet werden.

436) Beyträge zum Gebr. der Math. Teil II, Berlin 1770, p. 104.

437) Zur Lösung der Aufgabe: einen gegebenen Bruch mit möglichster Annäherung durch einen solchen mit vorgeschriebenem Zähler oder Nenner darzustellen (J. Polyt. Cah. 5 [1798], p. 93. Oeuvres 7, p. 291).

aus welcher sich mit Leichtigkeit alle weiteren Eigenschaften der aufsteigenden Kettenbrüche und ihrer Näherungsbrüche ergeben⁴³⁸).

58. Unendliche Determinanten: Historisches. Das Problem, ein System von *unendlich vielen* Lineargleichungen mit unendlich vielen Unbekannten aufzulösen⁴³⁹) und die bekannte Lösungsmethode für ein *begrenztes* System dieser Art mit Hilfe von *Determinanten* haben naturgemäss auf die Betrachtung „unendlicher“ *Determinanten* geführt. Der Versuch, diese Lösungsform *endlicher* Linearsysteme auf *unendliche* zu übertragen, ist wohl zuerst von *Th. Kötteritzsch* gemacht worden⁴⁴⁰). Das Wesen seiner Methode besteht darin, dass er ein beliebig vorgelegtes Linearsystem von der Form:

$$(120) \quad \sum_1^{\infty} a_{\mu}^{(\nu)} x_{\mu} = y_{\nu} \quad (\nu = 1, 2, 3, \dots \text{in inf.})$$

in ein anderes:

$$(121) \quad \sum_1^{\infty} b_{\mu}^{(\nu)} x_{\mu} = z_{\nu} \quad (\nu = 1, 2, 3, \dots)$$

transformiert, wo $b_{\mu}^{(\nu)} = 0$, so lange: $\mu < \nu$ (d. h. wo alle Koeffizienten links von der Hauptdiagonale verschwinden). Dieses letztere, dessen

Determinante sich auf den einfachen Ausdruck $\prod_1^{\infty} b_{\nu}^{(\nu)}$ reduziert,

kann (unter geeigneten, a. a. O. ganz unzureichend erörterten Konvergenzbedingungen) unmittelbar aufgelöst werden; und aus dem Umstande, dass diese Lösungen x_{μ} auch dem ursprünglichen Systeme (120) genügen müssen, lassen sich bestimmte Schlüsse auf den Wert (welcher

438) Im übrigen vgl. *S. Günther*, Verm. Unters. zur Gesch. der math. Wissenschaften. Leipzig 1876. (Kap. II. Die Lehre von den aufsteig. Kettenbrüchen in ihrer geschichtl. Entw. p. 93 ff.)

439) Dieses Problem kommt, allgemein zu reden, überall da zum Vorschein, wo es sich um Reihenentwicklungen nach der *Methode der unbestimmten Koeffizienten* handelt. Dabei wird es in dem vorliegenden Zusammenhange so aufgefasst, dass die für ein System von n Gleichungen geltende Lösung durch einen (allemaal noch speziell zu legitimierenden) *Grenzübergang* auf den Fall $n = \infty$ übertragen wird. Ein erstes Beispiel dieser Art liefert die Bestimmung der *Fourier'schen* Reihenkoeffizienten auf dem von *Lagrange* vorgezeichneten (*Oeuvres* 1, p. 80), aber (trotz der scheinbar widersprechenden Stelle I. c. p. 553 — vgl. *Riemann's* Bemerkungen, Werke p. 219) nicht bis zum Grenzübergange durchgeführten Wege (s. *Riemann-Hattendorff*, Part. Diff.-Gleichungen § 22). Ein anderes einfaches Beispiel ähnlicher Art (Reihenentwicklung der elliptischen Funktionen) giebt *P. Appell*: *Bullet. Soc. Math. d. Fr.* 13 (1885), p. 13. Vgl. auch die sich unmittelbar daran anschliessende Note von *Poincaré*.

440) *Z. f. Math.* 15 (1870), p. 1—15. 229—268.

= $\prod_{\nu=1}^{\infty} b_{\nu}^{(\nu)}$ gefunden wird) und die Eigenschaften der aus den $a_{\mu}^{(\nu)}$ gebildeten unendlichen Determinante und ihrer Unterdeterminanten ziehen. Obschon die fraglichen Arbeiten an mancherlei Unzulänglichkeiten und sogar wirklichen Unrichtigkeiten leiden, so haben sie schwerlich die völlige Nichtbeachtung verdient, die ihnen von allen späteren Bearbeitern dieses Gegenstandes zu teil geworden ist. Gewöhnlich wird die Einführung der unendlichen Determinanten dem amerikanischen Astronomen *G. W. Hill* zugeschrieben, der dieselben in einer Arbeit über Mondbewegung⁴⁴¹⁾ rein formal (d. h. ohne genügende analytische Begründung und die nötige Konvergenzuntersuchung, aber mit grossem praktischen Erfolge) dazu benützt hat, eine lineare Differentialgleichung durch Auflösung eines unendlichen Linearsystems zu integrieren. Die fragliche Lücke ist übrigens bald darauf durch *Poincaré* ausgefüllt worden⁴⁴²⁾. Letzterer giebt insbesondere den Konvergenzbeweis für die in Betracht kommende Klasse unendlicher Determinanten, welche dadurch charakterisiert ist, dass die Glieder $a_{\nu}^{(\nu)}$ der Hauptdiagonale (mit eventuellem Ausschlusse einer endlichen Anzahl) durchweg den Wert 1 haben, während die Gesamtheit der übrigen Glieder (mit eventuellem Ausschlusse einer endlichen Anzahl von Zeilen oder Kolonnen) eine absolut konvergente Doppelreihe bilden. Dieser nämlichen Klasse von Determinanten hat sich sodann auch *Helge von Koch* zur Koeffizientendarstellung der Integrale linearer Differentialgleichungen bedient⁴⁴³⁾ und ist im weiteren Verlaufe dieser Untersuchungen auf die Betrachtung einer etwas allgemeineren, von ihm als *Normalform* bezeichneten Klasse näher eingegangen⁴⁴⁴⁾; an die Stelle der Bedingung $a_{\nu}^{(\nu)} = 1$ tritt hier die absolute Konvergenz von $\prod_{\nu=-\infty}^{+\infty} a_{\nu}^{(\nu)}$. Ausser der Entwicklung ihrer Haupteigenschaften giebt er auch Anwendungen auf unendliche homogene Linearsysteme und lineare Differentialgleichungen⁴⁴⁵⁾. Schliesslich hat *T. Cazzaniga*⁴⁴⁶⁾

441) Acta math. 8 (1886), p. 26. (Im wesentlichen, Abdruck einer Monogr. Cambridge Mass. [U. S. A.], 1877).

442) Bullet. S. M. d. F. 14 (1886), p. 87.

443) Acta math. 15 (1891), p. 56.

444) Ibid. 16 (1892–93), p. 219.

445) Anwendungen auf nicht-homogene Linearsysteme ibid. 18 (1894), p. 377; desgl. auf Kettenbrüche (im Anschluss an die Nr. 46 erwähnte Determinantendarstellung der A_{ν} , B_{ν}) C. R. 120 (1895), p. 144. — Einige Bemerkungen über eine etwas allgemeinere Form konvergenter Determinanten nebst Anwendungen auf die Konvergenzbestimmung gewisser Potenzreihen giebt *G. Vicanti*, Ann. di Mat. (2), 21 (1893), p. 27.

in einer umfangreichen Arbeit eine zusammenhängende Theorie der unendlichen Determinanten entwickelt, die ausser den *Koch'schen* Resultaten noch mannigfache Ergänzungen und Verallgemeinerungen enthält. Insbesondere wird hier der von *Koch* anfangs ausschliesslich betrachtete Typus (den ich Nr. 59 als „vierseitig-unendlichen“ bezeichne) auf einen etwas einfacheren („zweiseitig-unendlichen“), übrigens späterhin gleichfalls von *Koch*^{446a)} untersuchten zurückgeführt.

59. Haupteigenschaften unendlicher Determinanten. Es sei eine zweifach-unendliche Zahlenfolge $(a_{\mu}^{(v)})_{\mu}^{\nu} = -\infty \dots +\infty$ vorgelegt und in Form eines vierseitig unbegrenzten Schemas angeordnet, derart, dass der obere Index eine bestimmte *Zeile*, der untere eine bestimmte *Kolonne* charakterisiert. Bildet man sodann die Determinante $(m+n+1)^{\text{ten}}$ Grades:

$$(122) \quad D^{m,n} = \begin{vmatrix} a_{-m}^{(-m)} & \dots & a_0^{(-m)} & \dots & a_n^{(-m)} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{-m}^{(0)} & \dots & a_0^{(0)} & \dots & a_n^{(0)} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{-m}^{(n)} & \dots & a_0^{(n)} & \dots & a_n^{(n)} \end{vmatrix} = \left[a_{\mu}^{(v)} \right]_{-m}^{+n}{}_{-m}^{+n}$$

(d. h. diejenige, deren *Hauptdiagonale* aus den Termen $a_{\nu}^{(v)}$ von $\nu = -m$ bis $\nu = n$ besteht), so heisst die *vierseitig-unendliche*⁴⁴⁷⁾ *Determinante der $(a_{\mu}^{(v)})$ konvergent* und D ihr *Wert*, wenn (im Sinne von Nr. 20)

$\lim_{m=\infty, n=\infty} D_{m,n} = D$ (d. h. endlich oder Null) ist⁴⁴⁸⁾, in Zeichen:

446) Ann. di Mat. (2), 26 (1897), p. 143. Vgl. auch: *E. H. Roberts*, Ann. of Math. 10 (1896), p. 35.

446a) Stockh. Acad. Bih. 22, No. 4, 1896.

447) Das Beiwort „vierseitig“ wurde in Rücksicht auf das folgende von mir hinzugefügt.

448) Diese von *Cazzaniga* (a. a. O. p. 146) gegebene Konvergenzdefinition erscheint mir konsequenter und zweckmässiger, als die ursprünglich von *Poincaré* eingeführte (a. a. O. p. 85) und auch von *Koch* acceptierte, wonach die Determinante schon *konvergent* genannt wird, wenn nur $\lim_{n=\infty} D_{n,n} = D$. Man pflegt

ja auch eine Reihe von der Form $\sum_{\nu=-\infty}^{+\infty} a_{\nu}$ erst *konvergent* zu nennen, wenn $\lim_{m=\infty, n=\infty} \sum_{\nu=-m}^n a_{\nu} = s$, nicht aber, wenn nur: $\lim_{n=\infty} \sum_{\nu=-n}^{+n} a_{\nu} = s$. In der That wird

auf diese Weise (ganz analog wie bei einer unendlichen Reihe der genannten Art) die Unabhängigkeit der Konvergenz und des Grenzwertes von der Wahl des Anfangsgliedes (vgl. *Cazzaniga* a. a. O. p. 151) erzielt, und es treten überhaupt erst die nötigen Analogien mit den *endlichen* Determinanten hervor. Im übrigen genügen die von *Poincaré* betrachteten, sowie die *Koch'schen* Normaldeterminanten *eo ipso* dieser engeren Definition (vgl. *Koch*, Acta math. 16, p. 221).

$$(123) \quad \left[a_{\mu}^{(\nu)} \right]_{(\mu, \nu)}^{+\infty}_{-\infty} = D.$$

Eine solche *konvergente unendliche* Determinante besitzt dann ganz ähnliche Fundamentealeigenschaften, wie eine *endliche*; insbesondere:

Sie bleibt ungeändert, wenn man mit Festhaltung der Hauptdiagonale die Zeilen zu Kolonnen macht.

Bei Vertauschung zweier Zeilen oder Kolonnen geht lediglich D in $-D$ über⁴⁴⁹), bleibt also ungeändert, wenn man gleichzeitig zwei Zeilen und zwei Kolonnen vertauscht. Infolge dessen lässt sich die *vierseitig*-unendliche Determinante durch successives Transponieren der Zeilen und Kolonnen in eine *zweiseitig*-unendliche verwandeln, z. B. in eine solche mit der Hauptdiagonale: $a_0^{(0)} a_1^{(1)} a_{-1}^{(-1)} \dots a_{\nu}^{(\nu)} a_{-\nu}^{(-\nu)} \dots$, wenn man jede Zeile und Kolonne mit *negativem* Index *unter* bzw. *hinter* die entsprechende mit *positivem* Index setzt⁴⁵⁰). Umgekehrt kann eine *zweiseitig*-unendliche Determinante von der Form⁴⁵¹):

$$(124) \quad D = \lim_{n=\infty} D_n = \left[a_{\mu}^{(\nu)} \right]_{\mu, \nu=1}^{\infty}, \quad \text{wo:} \quad D_n = \left[a_{\mu}^{(\nu)} \right]_{\mu, \nu=1}^n,$$

in eine konvergente *vierseitig*-unendliche transformiert werden, falls sie selbst *unbedingt*, d. h. in dem Sinne konvergiert, dass ihre Konvergenz durch Vertauschung von Zeilen oder von Kolonnen nicht alteriert wird⁴⁵²). Es genügt also, für alles weitere lediglich Determinanten dieser letzteren Form in Betracht zu ziehen. Multipliziert man alle Glieder einer Zeile oder Kolonne mit einem Faktor p , so geht D in $p \cdot D$ über. Allgemeiner findet man:

$$(125) \quad \left[p_{\mu} q_{\nu} \cdot a_{\mu}^{(\nu)} \right]_{\mu, \nu=1}^{\infty} = \prod_{\mu=1}^{\infty} \prod_{\nu=1}^{\infty} p_{\mu} \cdot q_{\nu} \cdot D,$$

falls das betreffende Produkt absolut konvergiert⁴⁵³).

Als *hinreichende* Bedingung für die unbedingte Konvergenz ergibt sich die *absolute* Konvergenz von $\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} a_{\mu}^{(\nu)} (\mu \leq \nu)$ und $\prod_{\mu=1}^{\infty} a_{\mu}^{(\mu)}$; ⁴⁵⁴⁾

449) Man hat also, gerade wie bei endlichen Determinanten, $D = 0$, wenn zwei Zeilen oder Kolonnen einander gleich sind.

450) Cazzaniga a. a. O. p. 153, Nr. 5.

451) Dieser etwas einfachere Typus bildet den Ausgangspunkt der *Poincaré'schen* Betrachtungen; a. a. O. p. 83.

452) Koch bezeichnet diese Eigenschaft als *absolute* Konvergenz (Acta math. 16, p. 229). Später (Stockh. Acad. Bih. 22) definiert er die *unbedingte* Konvergenz in etwas anderer Weise und giebt sowohl die *notwendigen* und *hinreichenden*, als auch lediglich *hinreichende* Bedingungen dafür an.

453) Cazzaniga a. a. O. p. 155, Nr. 7.

die Determinante heisst alsdann (nach dem Vorgange von *Koch*) eine *normale*. Eine *Normal-Determinante* bleibt *konvergent*, wenn man die Glieder einer *endlichen* Anzahl von *Zeilen* bzw. *Kolonnen* durch *beliebige endlich bleibende Zahlen* ersetzt⁴⁵⁴). Bezeichnet man als *Unterdeterminante* r^{ter} Ordnung diejenige Determinante, welche entsteht, wenn man sämtliche Glieder von r willkürlich gewählten Zeilen und ebensoviel Kolonnen durch 0, nur das der ρ^{ten} Zeile und ρ^{ten} Kolonne ($\rho = 1, 2, \dots, r$) gemeinsame Glied jedesmal durch 1 ersetzt, so folgt unmittelbar, dass *jede Unterdeterminante einer Normaldeterminante* wiederum eine *normale* ist. Ihr Wert stimmt, abgesehen von dem in jedem Falle bestimmbaren Vorzeichen, mit dem Werte derjenigen Determinante überein, welche aus der ursprünglichen durch blosser *Weglassung* der betreffenden Zeilen und Kolonnen entsteht. Bezeichnet man mit $A_\mu^{(\nu)}$ die Unterdeterminante *erster* Ordnung, welche durch die angegebene Modifikation der ν^{ten} Zeile und μ^{ten} Kolonne entsteht, so hat man:

$$(126) \quad D = \sum_1^\infty A_\mu^{(\nu)} \cdot a_\mu^{(\nu)} = \sum_1^\infty A_\mu^{(\nu)} \cdot a_\mu^{(\nu)} \\ (\nu = 1, 2, 3, \dots \text{ bzw. } \mu = 1, 2, 3, \dots).^{455})$$

Diese Entwicklung, wie auch verschiedene andere Formen ergeben sich aus der unmittelbar Gl. (124) entspringenden Beziehung:

$$(127) \quad D = D_1 + \sum_1^\infty (D_{\nu+1} - D_\nu).$$

Alle betreffenden Entwicklungen sind *absolut* konvergent. Der Wert einer Normaldeterminante wird nicht geändert, wenn man die Glieder $a_\mu^{(n)}$ der n^{ten} Zeile durch $a_\mu^{(n)} + \sum_\nu c_\nu a_\mu^{(n_\nu)}$ ersetzt (dabei darf die Summation auch über *unendlich* viele ganze Zahlen n_ν — excl. $n_\nu = n$ — erstreckt werden, sofern nur die $|c_\nu|$ unter einer endlichen Zahl bleiben). Das *Produkt* zweier Normaldeterminanten lässt sich wiederum durch eine *Normal-Determinante* darstellen, nämlich:

$$(128) \quad [a_\mu^{(\nu)}]_1^\infty \cdot [b_\mu^{(\nu)}]_1^\infty = [c_\mu^{(\nu)}]_1^\infty, \quad \text{wo: } c_\mu^{(\nu)} = \sum_1^\infty a_\mu^{(x)} b_\nu^{(x)}.$$

Die in allen diesen Sätzen hervortretende Analogie mit der Lehre von den *endlichen* Determinanten erstreckt sich *mutatis mutandis* auch auf

454) Diese Hauptsätze (nur mit der unwesentlichen Einschränkung $a_\nu^{(\nu)} = 1$) schon bei *Poincaré*.

455) Dagegen: $\sum_1^\infty A_\mu^{(\nu)} a_\mu^{(\rho)} = 0, \quad \sum_1^\infty A_\lambda^{(\nu)} a_\mu^{(\nu)} = 0.$

die Beziehung von $[a_{\mu}^{(v)}]_1^{\infty}$ zu der sog. *reziproken Determinante*⁴⁵⁶⁾: $[A_{\mu}^{(v)}]_1^{\infty}$ ⁴⁵⁷⁾

Von *konvergenten* Determinanten, welche *nicht* der Normalform angehören oder durch Abänderung einer endlichen Anzahl von Zeilen (Kolonnen) in dieselbe übergeführt werden können, hat *Koch* eine dazu in naher Beziehung stehende etwas allgemeinere Klasse hervorgehoben⁴⁵⁸⁾, *Cazzaniga* eine andere mit dem speziellen Grenzwerte 0 genauer untersucht⁴⁵⁹⁾.

456) Bei *Baltzer* (Determinanten § 6) als: Determinante des adjungierten Systems bezeichnet.

457) Näheres: *Cazzaniga* p. 187.

458) A. a. O. p. 235. Vgl. auch *Cazzaniga* p. 200. Die fraglichen Determinanten sind von der Form $[a_{\mu}^{(v)}]_1^{\infty}$, wo (bei geeigneter Wahl der Zahlen x_{μ}) für

$\mu \leq v$: $\sum \sum \frac{x_{\mu}}{x_v} \cdot a_{\mu}^{(v)}$ und $\prod a_v^{(v)}$ als absolut konvergent vorausgesetzt werden.

Vivanti bezeichnet a. a. O. diese Klasse von Determinanten als „normaloide“.

459) A. a. O. p. 205. Auf diesen nämlichen Typus, welcher mit gewissen Untersuchungen von *S. Pincherle* (Ann. di Mat. (2), 12 [1884], p. 29) im Zusammenhange steht, bezieht sich eine neuere Arbeit desselben Verfassers: Ann. di Mat. (3), 1 (1898), p. 84.

Nachträge.

Zu p. 74, *Fussn.* 134. Weitere Verallgemeinerungen des fraglichen Grenzwertsatzes s. *J. L. W. Jensen*, Par. C. R. 106 (1888), p. 833. 1520; *Stolz*, Math. Ann. 33 (1889), p. 237; *E. Schimpf*, Bochum, Gymn.-Progr. 1845, p. 6.

Zu p. 79, Nr. 21. Eine genügende Definition der Reihenkonvergenz hat schon *J. Fourier* in einer Abhandlung von 1811 (also vor *Bolzano* und *Cauchy*) gegeben: s. Par. Mém. 1819—20 [24], p. 326 (auch in die Théorie analytique de la chaleur übergegangen: Oeuvres 1, p. 156. 221). Freilich rechnet *Fourier* mit divergenten (ib. p. 149) und oscillierenden (p. 206. 234) Reihen ohne Skrupel.

Zu p. 105, *Fussn.* 277. Über asymptotische Darstellung von Integralen linearer Diff.-Gleichungen durch halbkonvergente Reihen vgl. *A. Kneser*, Math. Ann. 49 (1897), p. 389.

Zu p. 141, *Fussn.* 440. Vgl. *Fürstenau* a. a. O. p. 67. *Günther*, Determ. Cap. IV, § 6.

IA 4. THEORIE DER GEMEINEN UND HÖHEREN COMPLEXEN GRÖSSEN.

VON

E. STUDY
IN GREIFSWALD.

Inhaltsübersicht.

1. Imaginäre Grössen im 17. und 18. Jahrhundert.
 2. Rechnen mit Grössenpaaren.
 3. Gemeine complexe Grössen.
 4. Absoluter Betrag, Amplitude, Logarithmus.
 5. Darstellung der complexen Grössen durch Punkte einer Ebene.
 6. Darstellung gewisser Transformationsgruppen mit Hilfe gewöhnlicher complexer Grössen.
 7. Allgemeiner Begriff eines Systems complexer Grössen.
 8. Typen, Gestalten, Reducibilität.
 9. Systeme mit zwei, drei und vier Einheiten.
 10. Specielle Systeme mit n^2 Einheiten. Bilineare Formen.
 11. Specielle Systeme mit commutativer Multiplikation.
 12. Complexe Grössen und Transformationsgruppen.
 13. Klassifikation der Systeme complexer Grössen.
 14. Ansätze zu einer Funktionentheorie und Zahlentheorie der Systeme höherer complexer Grössen.
-

Vorbemerkung.

Die Theorie der *gemeinen* complexen Grössen bildet die Grundlage mehrerer der wichtigsten Zweige der Analysis, namentlich der Algebra und der Funktionentheorie. Sie wird daher in allen Lehrbüchern dieser Disciplinen, wie auch in den besseren Lehrbüchern der Infinitesimalrechnung abgehandelt. Wegen der grossen Zahl dieser Werke müssen wir auf eine Zusammenstellung ihrer Titel verzichten. In der Darstellung der Theorie selbst beschränken wir uns auf die ersten Elemente, und verweisen wegen weiterer Entwicklungen auf die Abschnitte I B und II B der Encyclopädie, ferner wegen specieller geometrischer und anderer Anwendungen auf die Artikel III A 7, III B 3 und III D 5, endlich auf die Bände IV und V. —

In der Theorie der Systeme von sogenannten *höheren* complexen Grössen bleiben die eigentlich geometrischen und physikalischen Anwendungen im Geiste von *W. R. Hamilton* und seinen Nachfolgern eben-

falls ausgeschlossen, da für die einen ein besonderer Artikel (III B 3) in Aussicht genommen ist, die anderen aber ebenfalls in den Bänden IV und V zur Sprache kommen werden. Hier werden nur die allgemeinen Sätze dargelegt, auf denen diese Anwendungen im letzten Grunde beruhen. Von Lehrbuchlitteratur dieses noch ziemlich neuen Zweiges der Algebra und Gruppentheorie wird daher nur zu nennen sein:

H. Hankel, Theorie der complexen Zahlen, Leipzig 1867. *S. Lie*, Vorlesungen über endliche continuierliche Gruppen, bearbeitet von *G. Scheffers*, Leipzig 1893 (Kap. 21). Nur auf einen sehr beschränkten Abschnitt dieser Theorie (§ 11 gegenwärtigen Artikels) bezieht sich eine Monographie von *B. Berloty*, Théorie des quantités complexes à n unités principales (Thèse. Paris 1886). Einiges darüber findet man auch bei *O. Stolz*, Vorlesungen über allgemeine Arithmetik, Bd. II, Leipzig 1886.

1. Imaginäre Grössen im 17. und 18. Jahrhundert. Der ursprüngliche Begriff der Zahl ist der der positiven ganzen Zahl. Wie nun das Bedürfnis nach einer einfacheren Darstellung und allgemeineren Ausführbarkeit gewisser Operationen schon in der elementaren Arithmetik mehrere Erweiterungen dieses einfachsten Zahlbegriffs veranlasst hat, indem zu den ganzen Zahlen die gebrochenen, zu den positiven die negativen, zu den rationalen die irrationalen „Zahlen“ oder „Grössen“ hinzugefügt wurden (I A 1 und I A 3), so hat dasselbe Bedürfnis zu einer fernerer Ausdehnung des Zahlbegriffs, zur Einführung der (gemeinen) „complexen“ Zahlen oder Grössen geführt: Man postulierte, um zunächst alle quadratischen Gleichungen wenigstens der Form nach auflösen zu können, die Quadratwurzel aus der negativen Einheit, die thatsächlich nicht vorhandene „Grösse“ $\sqrt{-1}$, als ein blosses Gedankending, ein Rechnungssymbol, eine „imaginäre“, „unmögliche“ Zahl. Mit diesem Symbol arbeitete man, mit allmählich wachsender Sicherheit, wie man es mit wirklichen Zahlgrössen zu thun gewohnt war. Dabei ergab sich ein doppelter Vorteil: Erstens zeigte es sich, dass nicht nur die Auflösung der quadratischen, sondern auch die der kubischen und biquadratischen Gleichungen mit Hülfe dieses Zeichens allgemein (formal) ausführbar wurde. Zweitens gelang es, durch Vermittelung des Symbols $\sqrt{-1}$ mehrere wichtige Funktionen der Analysis miteinander in Verbindung zu bringen. Das grösste Verdienst in dieser Periode der Theorie des Imaginären hat *L. Euler*, durch seine Entdeckung des Zusammenhanges der Exponentialfunktion mit den goniometrischen Funktionen, und durch seine daraus hervorgegangene Entscheidung der (ehe-

mals) berühmten Streitfrage „Ob auch negative Zahlen Logarithmen haben?“¹⁾

Die Einführung der „imaginären“ Größen begegnete anfänglich vielen Bedenken. Diese bezogen sich indessen nicht eigentlich auf die Sache selbst, sondern auf die Art ihrer Herleitung und auf die unklaren Vorstellungen, die von Vielen damit verknüpft wurden, und die namentlich in dem von *K. F. Gauss* gerügten Gebrauch des Wortes „unmöglich“ ihren Ausdruck gefunden haben. *Gauss* drückt sich über den Wert der imaginären Größen anfangs nicht sehr bestimmt aus²⁾; er hat sich aber jedenfalls sehr bald von ihrer Zulässigkeit und praktischen Unentbehrlichkeit überzeugt. Seine Autorität und die von ihm selbst gemachten Anwendungen auf Algebra und Zahlentheorie³⁾, ferner die Arbeiten von *N. H. Abel* und *C. G. J. Jacobi* über elliptische Funktionen [II B 6 a] haben die erhobenen Zweifel endgültig zerstreut. Leider hat *Gauss* die von ihm versprochene Rechtfertigung der Einführung der „imaginären“ oder, wie er später lieber sagte, „complexen“⁴⁾ Größen niemals geliefert; und das ist wohl der Grund dafür, dass man auch heute noch in verbreiteten Lehrbüchern eine Art der Darstellung antrifft, der man schwer entnehmen kann, was nach Ansicht der Verfasser Definition und was Folgerung sein soll.

2. Rechnen mit Größenpaaren. Bei Einführung der complexen oder imaginären Größen verfährt man am besten nach dem Vorgang von *W. R. Hamilton*^{4) 5)} in rein arithmetischer Weise, da so die Einmischung ungehöriger Vorstellungen mit Sicherheit vermieden werden kann.

Wir betrachten eine einzelne — positive oder negative, rationale oder irrationale — Grösse a als besonderen Fall eines geordneten, d. h. in bestimmter Reihenfolge gesetzten *Größenpaares* (a, α) ; wir

1) Wegen der Geschichte der Theorie des Imaginären s. *H. Hankel*, Theorie der complexen Zahlensysteme (Lpz. 1867), Abschnitt V. *E. Kossak*, Elemente der Arithmetik (Progr. Berl. Fried. Werd. Gymn. 1872). *R. Baltzer*, J. f. Math. 94 (1883), p. 87. *L. Janssen van Raay*, Arch. Teyler 4 (1894), p. 53. *A. Ramorino*, Giorn. di mat. 35 (1897), p. 233.

2) *S. Gauss*' Dissertation (Demonstratio nova etc.) Helmstedt 1799 = Werke 3, p. 3; deutsch von *E. Netto*, in *Ostwald's Klassikern* Nr. 14 (Lpz. 1890). Insbesondere kommt in Betracht die Anmerkung zu Nr. 3.

3) *Theoria residuorum biquadraticorum* II und die Selbstanzeige zu dieser Abhandlung (1831). Werke 2, p. 169. — Wegen des Vorkommens des Zeichens i für $\sqrt{-1}$ bei *L. Euler* s. die Abh. „De formulis differentialibus . . .“, Petrop. Acta (5. Mai) 1777, abgedruckt in *Instit. Calculi Integralis*, ed. tertia, Petrop. 1845, vol. 4, p. 183, bes. p. 184; vgl. *W. Beman*, Am. Bull. 4 (1898) p. 274.

4) *Dubl. Trans.* 17 (1837), p. 393.

5) *Lectures on Quaternions* (Dublin, 1853). Vorrede.

betrachten sie nämlich als ein Grössenpaar, dessen zweite Grösse α den Wert Null hat. Wir schreiben demgemäss $a = (a, 0)$. Die Regeln des gewöhnlichen Rechnens lassen sich dann in folgender Weise auf beliebige Grössenpaare (a, α) , (b, β) u. s. w. ausdehnen:

Zwei Grössenpaare (a, α) und (a', α') werden dann und nur dann einander gleich gesetzt, $(a, \alpha) = (a', \alpha')$, wenn $a = a'$ und $\alpha = \alpha'$ ist. Es wird ferner die „Summe“ zweier Grössenpaare (a, α) und (b, β) definiert durch die Formel:

$$(1) \quad (a, \alpha) + (b, \beta) = (a + b, \alpha + \beta).$$

Weiter wird das „Produkt“ eines Grössenpaares (a, α) und einer einzelnen Grösse $m = (m, 0)$ (s. oben) erklärt durch die Formel

$$(2) \quad m \cdot (a, \alpha) = (a, \alpha) \cdot m = (ma, m\alpha).$$

Aus diesen naheliegenden Festsetzungen folgt sofort, dass ein jedes Grössenpaar sich aus zwei „unabhängigen“ Grössenpaaren — sogenannten *Einheiten* — durch Multiplikation dieser Grössenpaare mit einfachen Grössen und nachfolgende Addition zusammensetzen lässt. Man hat zufolge (1) und (2):

$$(3) \quad (a, \alpha) = a \cdot (1, 0) + \alpha(0, 1);$$

oder, da nach obiger Definition $(1, 0) = 1$ ist, bei Einführung des neuen Zeichens i für die zweite Einheit $(0, 1)$

$$(3^*) \quad (a, \alpha) = a + i\alpha.$$

Alles dieses lässt sich offenbar ohne weiteres auf Grössentripel, Grössenquadrupel u. s. f. ausdehnen.

Man kann nun aber neben die gelehrt Addition der Zahlenpaare noch eine andere Art der Verknüpfung stellen, die die gewöhnliche Multiplikation zweier einfacher Grössen, sowie die durch (2) gegebene „Multiplikation“ einer einfachen Grösse und eines Grössenpaares umfasst, und wegen ihrer sonstigen Analogie mit der gewöhnlichen Multiplikation ebenfalls noch als „Multiplikation“ der Grössenpaare bezeichnet wird⁶⁾: Das „Produkt“ zweier Grössenpaare (a, α) und (b, β) wird erklärt durch die Formel

$$(4) \quad (a, \alpha) \cdot (b, \beta) = (ab - \alpha\beta, a\beta + b\alpha),$$

oder, bei Verwendung des eben angeführten Zeichens i , durch die äquivalente Formel

$$(4^*) \quad (a + i\alpha)(b + i\beta) = ab - \alpha\beta + (a\beta + b\alpha)i. \quad -$$

6) In allgemeinerem Sinne noch als in der Theorie der Systeme komplexer Grössen werden die Worte Produkt und Multiplikation von H. Grassmann und anderen verwendet. Wir verweisen auf Grassmann's Ges. Werke und insbesondere auf den Aufsatz „Sur les divers genres de multiplication“, J. f. Math. 49 (1855), p. 123.

Die Definition der Multiplikation der Grössenpaare durch die Formel (4) hat zunächst den Anschein der Willkür. Man sieht nicht sogleich, warum unter einer Menge verschiedener scheinbar gleichwertiger Bestimmungen gerade diese herausgegriffen wird. Dieser Anschein verschwindet indessen bei näherer Untersuchung, wobei sich zeigt, dass obige Festsetzung in der That vor anderen ausgezeichnet ist. (S. Nr. 11.)

Die Multiplikation der Grössenpaare genügt denselben formalen Regeln wie die Multiplikation der einfachen Zahlgrössen. Stellt man zur Abkürzung das Grössenpaar (a, a) oder $a + ia$ durch ein einfaches Zeichen A dar, so sind, ganz wie bei einfachen Grössen a, b, c, \dots , die (durch die Formeln (1) und (4) erklärten) Gleichungen

$$(5) \quad (A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C)$$

$$(6) \quad A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$$

$$(7) \quad A \cdot B = B \cdot A$$

erfüllt, die man heute allgemein als das *associative*, das *distributive* und das *commutative Gesetz der Multiplikation* bezeichnet⁷⁾ (vgl. I A 1, Nr. 7). Insbesondere folgt aus (4)

$$(8) \quad (1, 0) \cdot (0, 1) = (0, 1), \quad (0, 1) \cdot (0, 1) = (-1, 0)$$

oder

$$(8^*) \quad 1 \cdot i = i, \quad i \cdot i = i^2 = -1;$$

und es ist deutlich, dass diese Formeln (8), zusammen mit den aus dem gewöhnlichen Zahlenrechnen herübergenommenen Regeln (5), (6), (7), die Formel (4) vollständig ersetzen können. Es gilt endlich für die erklärte „Multiplikation“ der Grössenpaare ganz wie für die Multiplikation der einfachen Grössen der Satz, dass ein Produkt nicht verschwinden kann, ohne dass einer seiner Faktoren verschwindet.

Gleicht somit das Rechnen mit Grössenpaaren dem Rechnen mit einfachen Grössen in wichtigen Beziehungen, so unterscheidet es sich doch von diesem in einem wesentlichen Punkte: Die Formel (8) oder (8*) zeigt, dass im Bereiche der Grössenpaare die Gleichung $X \cdot X = (-1, 0)$ oder $X^2 = -1$ lösbar ist, während eine einfache Grösse $X = (X, 0)$, die dieser Gleichung genügte, nicht existiert. Die angeführte Gleichung wird nämlich erfüllt durch das Grössenpaar $X = (0, 1) = i$, wie auch durch das Grössenpaar $X = (0, -1) = -i$, aber durch kein weiteres Grössenpaar. Die durch die Gleichung $x^2 = a$ ausgedrückte Forderung pflegt man in der elementaren Algebra

7) Wegen des muthmasslichen Ursprungs dieser Namen s. *Hankel*, Theorie der complexen Zahlensysteme (Leipzig 1867), Anmerkung auf p. 3.

auch durch das Zeichen $x = \sqrt{a}$ darzustellen. Es steht nichts im Wege, diese Bezeichnung auf das Rechnen mit Grössenpaaren auszu dehnen. Man kann daher das bisher mit i bezeichnete Grössenpaar $(0, 1)$ auch mit $\sqrt{(-1, 0)}$ oder kürzer mit $\sqrt{-1}$ bezeichnen. Das Grössenpaar $-i$ oder $(0, -1)$ muss dann das Zeichen $-\sqrt{(-1, 0)}$ oder $-\sqrt{-1}$ erhalten, wobei natürlich das Vorzeichen der Wurzel in allen Rechnungen festzuhalten ist, so dass das einmal mit $\sqrt{-1}$ bezeichnete Grössenpaar nicht mit $-\sqrt{-1}$ verwechselt werden kann. Es ist aber seit *Gauss*³⁾ üblich geworden, die genannten beiden speciellen Grössenpaare durch die von *Euler* eingeführten Zeichen i und $-i$ darzustellen, wie wir es bereits gethan hatten.

3. Gemeine complexe Grössen. Der heute in der Analysis allgemein gebräuchliche Begriff der (gewöhnlichen) „complexen“ oder „imaginären“ Grösse unterscheidet sich von dem in Nr. 2 erklärten Begriff des Grössenpaares gar nicht; nur die *Terminologie* ist eine andere. Man hat es zweckmässig gefunden, dem Singularis „Grösse“ einen erweiterten Sinn beizulegen, und, was wir bisher „Grössenpaar“ nannten, ebenfalls noch als „Grösse“ zu bezeichnen. Der Begriff des Dualis wird dann in das Beiwort „complex“ verlegt: Die einfache Grösse $a = (a, 0)$, die einzige Zahlgrösse, die die elementare Arithmetik kennt, heisst nunmehr zum Unterschiede von der complexen oder imaginären „Grösse“ eine „reelle“ Grösse. Die Nützlichkeit dieser auf den ersten Blick jedenfalls befremdlichen Redeweise kann im Grunde nur durch den Aufbau der gesamten Analysis dargethan werden; wir begnügen uns hier mit dem Hinweise auf die Umgestaltung und Erweiterung, die der Fundamentalsatz der Algebra [I B 1, 3] bei Einführung dieser Terminologie erfährt. Während man im Gebiete der gewöhnlichen (sog. reellen) Grössen nur sagen kann, dass eine ganze Funktion n^{ten} Grades einer Veränderlichen x als Produkt von ganzen Funktionen ersten oder zweiten Grades dargestellt werden kann, gilt im Gebiete der complexen Grössen der einfachere Satz, dass jede solche Funktion ein Produkt von Funktionen ersten Grades ist; und zwar gilt dieser Satz auch für ganze Funktionen mit complexen Coefficienten. —

Gänzlich verschieden von der hier vorgetragenen Exposition ist der Vorschlag *A. Cauchy's*, i als eine reelle *veränderliche* Grösse aufzufassen, und an Stelle von Gleichungen Congruenzen nach dem Modul $i^2 + 1$ zu betrachten⁸⁾. Zwei ganze rationale Funktionen der (reellen) Veränderlichen i heissen nach dem allgemeinen Congruenzbegriff dann

8) *Cauchy*, Exercices d'analyse et de physique math. 4 (1847), p. 84.

congruent nach dem Modul $i^2 + 1$ („äquivalent“ nach *Cauchy*), wenn sie, durch $i^2 + 1$ geteilt, denselben Rest lassen. An Stelle der Gleichung (4*) z. B. tritt dann die Congruenz

$$(a + i\alpha)(b + i\beta) \equiv (ab - \alpha\beta) + i(a\beta + b\alpha) \pmod{i^2 + 1}.$$

Dieser Gedanke ist neuerdings noch von *L. Kronecker* verallgemeinert worden⁹⁾. [Vgl. B 1, 3; C 5.] Ob und wie weit er sich ausserhalb des Bereiches der Algebra als brauchbar erweist, darüber liegen Untersuchungen zur Zeit nicht vor.

4. Absoluter Betrag, Amplitude, Logarithmus. Die Zahl Eins wird die reelle, i die *imaginäre*, auch wohl „laterale“ Einheit genannt. Ist $z = x + iy$ irgend eine complexe Grösse, so heisst x der *reelle*, iy der *imaginäre Bestandteil* von z . Der reelle Bestandteil wird nach *K. Weierstrass* (Vorlesungen) vielfach mit $\Re(z)$ bezeichnet. Ist $y = 0$, so heisst die Grösse z , wie gesagt, reell, ist $x = 0$, so heisst sie „rein imaginär“. Der positive Wert der Quadratwurzel $\sqrt{x^2 + y^2}$ wird „Modul“ (*Cauchy*, An. alg. 1821, cap. 7, § 2), besser — wegen der Vieldeutigkeit dieses Wortes — nach *Weierstrass* „absoluter Betrag“ der Zahl z genannt, und durch $\text{mod. } z$, abs. z , meist aber (nach *Weierstrass*) durch das Zeichen $|z|$ dargestellt. Das Quadrat dieser reellen Grösse — also die Summe $x^2 + y^2$ — wird nach *Gauss* die „Norm“ von z genannt⁹⁾ und vielfach mit $N(z)$ bezeichnet.

Je zwei complexe Grössen von der Form $x + iy$ und $x - iy$ heissen „conjugiert-complex“ oder „conjugiert-imaginär“. (*Cauchy*, An. alg. cap. 7, § 1.) Wird die erste z genannt, so wird die zweite vielfach mit \bar{z} bezeichnet. Das Produkt zweier conjugiert-complexer Grössen ist reell und gleich der Norm einer jeden von ihnen, $z \cdot \bar{z} = x^2 + y^2$. Die eindeutig bestimmte complexe Grösse, die mit z multipliciert die Zahl Eins liefert, wird der „reciproke Wert“ von z genannt, und mit $\frac{1}{z}$ oder z^{-1} bezeichnet; es ist

$$\frac{1}{z} = \frac{\bar{z}}{|z|^2} = \frac{x - iy}{x^2 + y^2} \quad (|z| \neq 0).$$

Jede complexe Grösse $z = x + iy$ kann auf die Form

$$z = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$$

gebracht werden, wo $r = |z| = \sqrt{x^2 + y^2}$ den absoluten Betrag, und φ einen reellen, bis auf Vielfache von 2π bestimmten Winkel bedeutet. (*Euler*, *Jean le Rond d'Alembert*. S. Anm. 1.) Der zweite Faktor des Ausdruckes wird zuweilen „Richtungscoefficient“ genannt (expres-

9) J. f. Math. 100 (1887) p. 490, vgl. 101, p. 337. *J. Molk*, Acta Math. 6 (1884), p. 8. Vgl. ferner unsere Anmerkung 33, sowie I A 3 Anm. 42.

sion reduite n. Cauchy); der Winkel φ selbst heisst „*Amplitude*“, auch „*Argument*“, „*Abweichung*“, „*Anomalie*“, „*Azimuth*“, „*Arcus*“ der complexen Grösse z . „*Hauptwert*“ der Amplitude heisst der Wert von φ , der den Ungleichungen $-\pi < \varphi \leq +\pi$ genügt. Ist

$$(9) \quad \begin{aligned} z &= r(\cos \varphi + i \sin \varphi), \quad \text{so ist} \\ \frac{1}{z} &= \frac{1}{r}(\cos \varphi - i \sin \varphi). \end{aligned}$$

Für Grössen von der besonderen Form $\cos \varphi + i \sin \varphi$ gilt die sogenannte *Moirre'sche Formel*:

$$(\cos \varphi + i \sin \varphi)(\cos \psi + i \sin \psi) = \cos(\varphi + \psi) + i \sin(\varphi + \psi).$$

Mit Ausnahme der Null lässt sich ferner jede complexe Grösse z durch eine andere complexe Grösse ξ in der Gestalt

$$(10) \quad z = e^{\xi} = 1 + \xi + \frac{1}{1 \cdot 2} \cdot \xi^2 + \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot \xi^3 + \dots$$

darstellen (II B 1). Wegen der durch die Formeln $e^{\xi_1} \cdot e^{\xi_2} = e^{\xi_1 + \xi_2}$ und $e^{2\pi i} = 1$ ausgedrückten Eigenschaften der Exponentialfunktion ist dabei die complexe Grösse ξ nur bis auf Vielfache von $2\pi i$ bestimmt. Diese unendlich vieldeutige Grösse wird der *Logarithmus* von z genannt, und durch das Zeichen $\xi = \log z$ oder $\xi = \lg z$ oder endlich $\xi = \lg z$ dargestellt. „*Hauptwert*“ des Logarithmus heisst der Wert von ξ , dessen imaginärer Bestandteil, geteilt durch i , grösser als $-\pi$ und kleiner als oder gleich $+\pi$ ist ($-\pi < \Re\left(\frac{\xi}{i}\right) \leq \pi$). Der Hauptwert des Logarithmus einer reellen positiven Grösse ist reell und identisch mit dem *natürlichen* (Neper'schen) Logarithmus (I A 1, 3); der Hauptwert des Logarithmus einer negativen reellen Grösse hat den imaginären Bestandteil $i\pi$. Eine imaginäre Grösse, deren absoluter Betrag den Wert Eins hat, hat rein imaginäre Logarithmen und umgekehrt. Allgemeiner ist, sobald wir unter $\lg r$ irgend einen Wert des Logarithmus der positiven Grösse r verstehen,

$$(11) \quad \begin{aligned} \xi &\equiv \lg r + i\varphi \pmod{2i\pi}, \quad \text{wenn} \\ z &= r(\cos \varphi + i \sin \varphi) \quad (r = |z|). \end{aligned}$$

An Stelle der Congruenz tritt hier die Gleichung $\xi = \lg r + i\varphi$, wenn man für die Amplitude φ , wie auch für den Logarithmus ξ deren Hauptwerte setzt. Für $r=1$ ergibt sich aus (11) die *Euler'sche Gleichung*

$$(12) \quad e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi,$$

die übrigens auch für complexe Werte des Argumentes φ Gültigkeit hat. (*Introductio in anal. inf.*; vgl. Anm. 1.)

Durch die zusammengehörigen Formeln

$$(13) \quad z_1 \cdot z_2 = z_3, \quad \xi_1 + \xi_2 \equiv \xi_3 \pmod{2i\pi}$$

wird vermöge der Logarithmen die Multiplikation der complexen Grössen auf eine Addition zurückgeführt.

5. Darstellung der complexen Grössen durch Punkte einer Ebene. Das Rechnen mit den complexen Grössen lässt sich anschaulich auffassen, wenn man sich einer geometrischen Vorstellungsweise bedient¹⁰⁾. Diese besteht einfach darin, dass man die complexe Grösse $z = x + iy$ durch den Punkt einer Ebene darstellt, der die rechtwinkligen Cartesischen Coordinaten x und y hat. Die in § 4 eingeführten Grössen r und φ sind dann Polarcoordinaten (III B 2) desselben Punktes. (S. Fig. 1.) Die Summe zweier complexer Grössen, d. h. der Punkt, der dieser Summe entspricht, wird dann durch die aus der elementaren Mechanik bekannte Parallelogrammconstruction (Fig. 2) gefunden; eine Regel, die man als (geometrische) *Addition der Strecken* (Vektoren der englischen Mathematiker) bezeichnet (III B 3). Um das Produkt zweier complexer Grössen

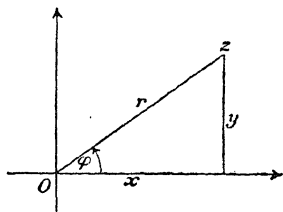


Fig. 1.

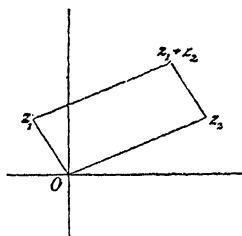


Fig. 2.

$$z = r (\cos \varphi + i \sin \varphi)$$

10) Diese wurde bis vor kurzem *J. R. Argand* und *Gauss* zugeschrieben. Sie findet sich aber zuvor schon und zwar vollständig in einer 1797 der Dänischen Akademie eingereichten, 1798 gedruckten und 1799 erschienenen, aber erst neuerdings bekannt gewordenen Arbeit von *Caspar Wessel* (Om Directionens analytiske Betegning; reproducirt Arch. for Math. ok Nat. 18, 1896, sowie unter dem Titel: Essai sur la représentation de la direction, Copenhague 1897).

Gauss hat in seiner Dissertation (1799) die Darstellung der complexen Grössen durch Punkte einer Ebene benutzt, um daran gewisse Betrachtungen zu knüpfen, die dem heute als *Analysis situs* (III A 4) bezeichneten Gebiet angehören. Die geometrische Bedeutung der einfachsten Rechnungsoperationen wurde alsdann von *Argand* dargelegt (Essai sur une manière de représenter les quantités imaginaires dans les constructions géométriques, Paris 1806), und nach *Wessel* und *Argand* auch von einer Reihe anderer Geometer (s. die zweite Ausgabe von *Argand's* Schrift von *J. Hoüel*, Paris 1874). *Gauss* benutzt sie im Druck nicht vor 1825 (Abhandlung über Kartenprojektionen, Astron. Abh. von *Schumacher*, Heft 3, Altona 1825; Werke 4, p. 189; *Ostwald's* Klassiker Nr. 55, Leipzig 1874). Vgl. indessen *Gauss's* Brief an *Bessel* vom 18. Dez. 1811.

Andere Darstellungsweisen des Imaginären, hierhergehörige Betrachtungen über Doppelverhältnisse, die sogenannte geometrische Theorie des Imaginären, ferner Anwendungen auf Funktionentheorie, reelle Geometrie, Zahlentheorie und Mechanik werden in den diese Gegenstände behandelnden Artikeln der Encyclopädie zu besprechen sein.

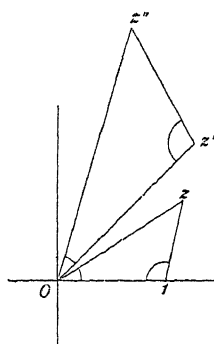


Fig. 3.

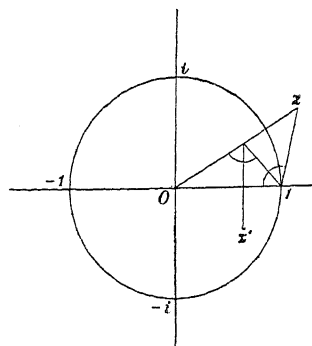


Fig. 4.

und

$$z' = r' (\cos \varphi' + i \sin \varphi')$$

darzustellen, drehe man die Strecke (r', φ') um den Winkel φ im positiven Sinn der Winkel, und vergrössere hierauf den Radius r' im Verhältnis $r:1$. Der so, mit Hülfe zweier ähnlicher Dreiecke, gefundene Punkt ist der, der das Produkt $z'' = z z'$ repräsentiert (Fig. 3).

Endlich wird der reciproke Wert von z in folgender Weise geometrisch bestimmt: Man unterwirft den Punkt z einer Transformation durch reciproke Radien (Inversion, III A 7) in Bezug auf den Kreis, der mit dem Radius Eins um den Anfangspunkt der Coordinaten beschrieben ist, und sucht hierauf das Spiegelbild des gefundenen Punktes in Bezug auf die x -Achse: der so ermittelte Punkt ist der, der die complexe Grösse $z' = \frac{1}{z}$ repräsentiert (Fig. 4).

Hiernach kann man durch Construction das Bild einer jeden complexen Grösse ermitteln, die aus einer endlichen Anzahl von solchen durch die Operationen der Addition, Multiplikation und Division in endlicher Wiederholung entsteht.

6. Darstellung gewisser Transformationsgruppen mit Hülfe gewöhnlicher complexer Grössen. Die in Nr. 5 besprochene Deutung des Rechnens mit complexen Grössen durch geometrische, in einer Ebene auszuführende Operationen ist von Bedeutung geworden durch ihre zahlreichen Anwendungen in der Algebra, Funktionentheorie, Geometrie und mathematischen Physik. Wir bringen hier nur die Verwendung der gewöhnlichen complexen Grössen zur analytischen Darstellung gewisser *Transformationsgruppen* [s. durchweg Art. II A 6] einer zweifach ausgedehnten Mannigfaltigkeit zur Sprache.

Eine jede der Formeln

$$(14) \quad z' = z + a,$$

$$(15) \quad z' = az,$$

$$(16) \quad z' = az + b,$$

$$(17) \quad z' = \frac{az + b}{cx + d} \quad (ad - bc \neq 0),$$

stellt, wenn man die Grössen a, b, \dots als Parameter, x als unabhängige, x' als abhängige Veränderliche auffasst, die sämtlichen Transformationen einer nach der Terminologie von *S. Lie* endlichen kontinuierlichen Gruppe [II A 6] vor. Deutet man x etwa als Abscisse eines Punktes in einer geraden Linie, so stellt die Formel (17) die reellen Transformationen der dreigliedrigen sog. allgemeinen projectiven Gruppe dieser einfach ausgedehnten Mannigfaltigkeit dar, und die Formeln (14) bis (16) liefern alle „Typen“ kontinuierlicher Untergruppen dieser Gruppe: (16) die zweigliedrige Gruppe aller der Transformationen von (17), die einen bestimmten Punkt — den Punkt ∞ — in Ruhe lassen; (15) die eingliedrige Untergruppe, bei der zwei Punkte — 0 und ∞ — in Ruhe bleiben; (14) endlich die Ausartung der letzten Gruppe, alle Transformationen der Gruppe (17) enthaltend, die einzeln einen bestimmten Punkt — den Punkt ∞ — und keinen weiteren in Ruhe lassen. Entsprechendes gilt, wenn man den Grössen x und x' , wie auch den Parametern a, b, \dots complexe Werte beilegt, und, wie es gebräuchlich ist, von „imaginären“ Punkten der Geraden spricht [III A 1, 5; B 1]: die Formeln umfassen, in dieser allgemeineren Bedeutung, alle reellen und „imaginären“ Transformationen der genannten Gruppen.

Lässt man x, x', a, b, \dots wieder complexe Grössen bedeuten, bedient man sich aber der unter (5) besprochenen Darstellung dieser Grössen durch die reellen Punkte einer Ebene, so dienen dieselben Formeln zur analytischen Darstellung anderer Gruppen, und zwar zunächst zur Darstellung der *reellen* Transformationen gewisser kontinuierlicher Gruppen einer zweifach ausgedehnten Mannigfaltigkeit. Offenbar umfasst (14) jetzt die Gesamtheit aller reellen sogenannten „Schiebungen“, die Transformationen einer zweigliedrigen reellen Gruppe, bei denen ein jeder Punkt um eine Strecke von constanter Länge und Richtung fortgerückt wird; (15) stellt eine reelle zweigliedrige Gruppe von Ähnlichkeitstransformationen dar, die Gesamtheit aller „eigentlichen“ Ähnlichkeitstransformationen (Transformationen ohne Umlegung der Winkel) umfassend, bei denen der Anfangspunkt — der Punkt 0 — in Ruhe bleibt; (16) bedeutet die reellen Transformationen der viergliedrigen Gruppe *aller* eigentlichen Ähnlichkeitstransformationen, die entsteht, wenn man die Transformationen (14) und (15) zusammensetzt; (17) endlich umfasst die Gesamtheit aller reellen Punkttransformationen der Ebene, die Kreise in Kreise überführen und den Sinn der Winkel ungeändert lassen¹¹⁾.

11) Art. über Inversionsgeometrie, III A 7. — Es ist mir nicht bekannt, wer den letzten Satz gerade in dieser Form zuerst ausgesprochen hat. In der

Zu diesen als den einfachsten geometrischen Anwendungen complexer Grössen kommen noch andere ähnlicher Art. So stellen die Formeln (17) zusammen mit den Formeln

$$(17b) \quad \bar{x}' = \frac{ax + b}{cx + d} \quad (ad - bc \neq 0),$$

(worin \bar{x}' die zu x' conjugiert-complexe Grösse bedeutet) die Gesamtheit *aller* reellen Punkttransformationen einer Ebene vor, die Kreise in Kreise überführen, die sechsgliedrige (sog. gemischte) Gruppe der *Möbius'schen* Kreisverwandtschaften; bei Beschränkung der Parameter a, b, c, d in (17) auf reelle Werte entstehen die reellen Transformationen einer dreigliedrigen Untergruppe, die bei Beschränkung von x auf Werte mit positivem imaginärem Bestandteil aufgefasst werden kann als die Gruppe der Bewegungen in einer Nicht-Euclidischen, sog. *Lobatschewsky'schen* Ebene [III A 1; B 1]. Lässt man für a, b, c, d nur ganzzahlige Werte zu, die in der Beziehung $ad - bc = 1$ stehen, so geht aus (17) eine Gruppe von unendlich vielen discreten Transformationen hervor, die in der Theorie der elliptischen Funktionen, insbesondere der sog. Modulfunctionen auftritt [II B 6a und c]. Versteht man ferner unter $f(x)$ irgend eine analytische Function der complexen Veränderlichen x [II B 1], so vermitteln die Formeln $x' = f(x)$ und $\bar{x}' = \overline{f(x)}$ die allgemeinste conforme Abbildung einer Ebene auf sie selbst oder auf eine andere Ebene [II B 1 und III D 6]. Ferner steht nichts im Wege, z. B. in den Formeln (14) bis (17), nachdem beiderseits die reellen und imaginären Bestandteile gesondert sind, den nunmehr reellen Parametern und Veränderlichen nachträglich von neuem complexe Werte beizulegen: die Formeln (14) bis (17) können dann aufgefasst werden als eine symbolische Darstellung sämtlicher, nämlich aller reellen und „imaginären“ Transformationen der zuvor besprochenen Gruppen.

Das Feld dieser Anwendungen erweitert sich noch, wenn man an Stelle der hier zu Grunde gelegten Deutung von ξ, η als Cartesischen Coordinaten irgend eine andere zulässige geometrische Deutung dieser Grössen setzt. Unter diesen wird vielfach verwendet eine Darstellung der complexen Grössen $x = \xi + i\eta$ durch Punkte einer Kugel, eine Abbildungsart, die aus der *Wessel-Argand'schen* durch stereographische Projektion hervorgeht [II B 1, 2 b, c; III A 7, B 2, 3]. Wir erwähnen den hierdurch vermittelten Zusammenhang der Eigenschaften der regulären Körper mit gewissen Problemen der Algebra und Funk-

Hauptsache rührt sein Inhalt wohl von *Möbius* her (Abhandlungen aus den Jahren 1853—58, Ges. Werke 2).

tionentheorie, und neuere Anwendungen auf ein Problem der Mechanik.¹²⁾

Alle diese Anwendungen complexer Grössen und viele andere, wie z. B. die in der Theorie der Wärmeleitung und der Minimalflächen [III D 5, 6] haben das Gemeinsame, dass bei ihnen die Eigenschaft des Rechnens mit complexen Grössen als einer Erweiterung des gewöhnlichen Zahlenrechnens in den Hintergrund tritt, und dass diese Grössen als ein sogenannter *Algorithmus* oder *geometrischer Calcul* zur Zusammenfassung und formalen Vereinfachung mehrerer Formeln der analytischen Geometrie dienen. Es ist das eben der Gesichtspunkt, von dem aus die Einführung der nunmehr von uns zu betrachtenden sogenannten höheren complexen Grössen sich als fruchtbringend erwiesen hat.

7. Allgemeiner Begriff eines Systems complexer Grössen. An das geschilderte Rechnen mit Grössenpaaren schliesst sich naturgemäss ein solches mit Tripeln, Quadrupeln u. s. w. von Grössen; und zwar kann man, nachdem das Rechnen mit den gewöhnlichen complexen Grössen einmal begründet ist, einmal reelle, sodann aber auch gewöhnliche complexe Grössen zu Paaren, Tripeln u. s. w. zusammenstellen. Je nachdem man das Eine oder das Andere thut, ergeben sich zwei verschiedene Begriffe eines „*Systems complexer Grössen*“ oder „*complexer Zahlen*“¹³⁾.

Seien also $\rho, a_1, a_2, \dots a_n$ je nach der getroffenen Festsetzung entweder reelle oder gewöhnliche complexe Grössen, so wird man

12) H. A. Schwarz, J. f. Math. 75, p. 292 = Werke 2, p. 211. F. Klein, Vorlesungen über das Ikosaeder. Leipzig 1884. H. Weber, Algebra II. Braunschw. 1896. F. Klein u. A. Sommerfeld, Theorie des Kreisels. Leipzig 1897.

13) Die zweite Ausdrucksweise ist die üblichere. Wir ziehen die erste vor, da diesen Gebilden auch eine der gewöhnlichen Theorie der ganzen Zahlen analoge *Zahlentheorie* zukommt. (Vgl. Anmerk. 52.) — Beide Begriffe gehen im wesentlichen zurück auf *Hamilton*, der in seinen Quaternionen und Biquaternionen bereits 1843 das nach den gemeinen complexen Grössen interessanteste Beispiel geliefert hat. Doch macht *H.* (Lectures, Preface) bei der Multiplikation eine Unterscheidung zwischen Operator und Operandus, die für die Anwendungen nicht nötig ist und die Klarheit der Darstellung beeinträchtigt. Diese Unterscheidung scheint zuerst von *H. Hankel* (a. a. O.) aufgehoben worden zu sein. Mathematiker englischer Zunge gebrauchen nach dem Vorgange von *B. Peirce* (vgl. Anm. 17) den Ausdruck „*Linear Associative Algebra*“ für unseren Gegenstand, Einige verwenden auch das Wort *Algebra* im Pluralis. — Bei den verwandten Begriffsbildungen *Grassmann's* (s. Anmerk. 6) fehlt ein wesentliches Moment, nämlich die Zurückleitung der Produkte auf die Grössen des Systems selbst. — Wegen der vor *Hamilton* unternommenen Versuche, complexe Grössen mit mehr als zwei Einheiten einzuführen, s. *Hankel* a. a. O., § 28 Anm.

zunächst zwei n -tupel $(a_1, a_2, \dots a_n)$ und $(b_1, b_2, \dots b_n)$ nur dann als „gleich“ gelten lassen, wenn $a_1 = b_1, \dots a_n = b_n$ ist. Es wird sodann die Addition zweier Grössen- n -tupel definiert durch die Formel

$$(a_1, a_2, \dots a_n) + (b_1, b_2, \dots b_n) = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, \dots a_n + b_n),$$

ferner die Multiplikation eines n -tupels mit irgend einer Grösse ϱ durch

$$\varrho(a_1, a_2, \dots a_n) = (\varrho a_1, \varrho a_2, \dots \varrho a_n).$$

Aus diesen beiden Definitionen folgt, dass jedes System von n Grössen sich additiv mit numerischen Coefficienten aus n passend gewählten zusammensetzen lässt, z. B.

$$(a_1, a_2, \dots a_n) = a_1(1, 0, 0, \dots 0) + a_2(0, 1, 0, \dots 0) + \dots$$

Solche in *in mannigfacher Weise auswählbare* n -tupel werden „*Einheiten*“ genannt¹⁴⁾, und (wie überhaupt beliebige n -tupel) durch einfache Zeichen, etwa durch e_1, e_2, \dots dargestellt, so dass

$$(a_1, a_2, \dots a_n) = a = a_1 e_1 + a_2 e_2 + \dots + a_n e_n$$

geschrieben werden kann. Die Einheiten $e_1, \dots e_n$ bilden zusammen eine sogenannte *Basis* (*Dedekind, Molien*, vgl. Anm. 31, 45), ihre reellen oder gewöhnlichen complexen Coefficienten $a_1, \dots a_n$ heissen *Coordinaten* oder auch *Componenten* des n -tupels.

Der spezifische Begriff eines (geschlossenen) „Systems complexer Grössen“ ergibt sich hieraus erst, wenn man neben die angeführten Operationen noch eine weitere, die sogenannte *Multiplikation* zweier n -tupel stellt. Diese kann an und für sich in verschiedener Weise erklärt werden⁶⁾, man pflegt aber an sie, wofern man von einem „System complexer Grössen“ spricht, heute ziemlich allgemein die folgenden Forderungen zu stellen:

I. Das „Produkt“ oder „symbolische Produkt“ ab zweier n -tupel a, b , oder, was nun dasselbe bedeuten soll, zweier aus den Einheiten $e_1, \dots e_n$ ableitbarer „complexer Grössen“ a, b (s. oben) soll wieder ein n -tupel derselben Art, also eine aus denselben Einheiten ableitbare complexe Grösse sein.

II. Diese („symbolische“) Multiplikation soll mit der Addition durch das „distributive Gesetz“ verbunden sein:

$$(18) \quad a(b + c) = ab + ac, \quad (b + c)a = ba + ca.$$

III. Die Multiplikation soll das „associative Gesetz“ erfüllen:

$$(19) \quad (ab)c = a(bc).$$

Nicht allgemein verlangt wird das Bestehen des „commutativen Ge-

14) *Weierstrass* und andere gebrauchen den Ausdruck *Haupteinheiten*.

setzes“ $ab = ba$ für die als Multiplikation bezeichnete Verknüpfung, weshalb auch von den beiden Forderungen (18) keine eine Folge der anderen ist. Dagegen pflegt man als weitere Forderung hinzuzufügen:

IV. Die Multiplikation soll eine im allgemeinen umkehrbare Operation sein, es soll also im allgemeinen möglich sein, aus einer Gleichung der Form $ab = c$ die Grösse a sowohl als auch die Grösse b zu bestimmen, wenn im einen Fall b und c , im anderen a und c gegeben sind. Diese Forderung der Möglichkeit beider Arten von „Division“ ist äquivalent mit der anderen, dass eine complexe Grösse $e^0 = \varepsilon_1 e_1 + \dots + \varepsilon_n e_n$ vorhanden sein soll, die den beiden Gleichungen

$$(20) \quad e^0 a = a, \quad a e^0 = a$$

identisch (für alle Wertsysteme der Coordinaten a_1, \dots, a_n) genügt. —

Nach dem üblichen Sprachgebrauch ist also ein „System complexer Grössen“ erst dann vollkommen definiert, wenn die bei der Multiplikation zweier n -tupel oder Grössen $a = \sum a_i e_i$, $b = \sum b_i e_i$ anzuwendenden Rechnungsregeln bekannt sind. Die Bedingungen I und II werden in allgemeinsten Weise erfüllt, wenn man setzt

$$(21) \quad e_i e_\kappa = \sum_1^n \gamma_{i\kappa s} e_s \quad (i, \kappa = 1 \dots n),$$

und unter $\gamma_{i\kappa s}$ reelle oder gewöhnliche complexe Grössen versteht. Die Bedingung III wird sodann erfüllt, wenn allgemein $(e_i e_\kappa) e_l = e_i (e_\kappa e_l)$ ist, wenn man also die n^3 Grössen $\gamma_{i\kappa s}$ derart wählt, dass

$$(22) \quad \sum_1^n \gamma_{i\kappa s} \gamma_{s j t} = \sum_1^n \gamma_{\kappa j s} \gamma_{i s t}$$

wird ($i, \kappa, j, t = 1, 2, \dots, n$). Die letzte Forderung IV endlich deckt sich mit der anderen, dass keine der Determinanten [I B 1]

$$(23) \quad \left| \sum_i \gamma_{i\kappa s} a_i \right|, \quad \left| \sum_\kappa \gamma_{i\kappa s} a_\kappa \right|$$

identisch (für jede Wahl der Grössen a_i) verschwinden soll.

Sind diese beiden letzten Forderungen erfüllt, so haben die beiden Determinanten (23), als Funktionen der Grössen a_i , dieselben (im analytischen Sinne, II B 1) irreducibelen Teiler; sie verschwinden also für dieselben Wertsysteme dieser Grössen. Sind sie für ein bestimmtes Grössensystem a_1, \dots, a_n von Null verschieden, so haben die beiden Gleichungen

$$(24) \quad ax = b, \quad ya = b$$

jede eine und nur eine Lösung x, y ; und es wird insbesondere $x = y = e^0$, wenn $b = a$ (s. Gl. 20); sind jene Determinanten da-

gegen gleich Null, so giebt es immer von Null verschiedene Lösungen x, y der beiden Gleichungen

$$(25) \quad ax = 0, \quad ya = 0.$$

a, x und y heissen dann „Teiler der Null“, nach *K. Weierstrass*, der übrigens auch die Null $(0, 0, \dots 0)$ selbst noch unter diesen Begriff fasst. (Vgl. Anm. 30.)

Die Grösse e^0 nimmt innerhalb des betrachteten Systems complexer Grössen eine ähnliche Stellung ein, wie die Einheit unter den reellen Grössen. Sie ist deshalb die „Zahl Eins“ des Systems genannt worden, auch hat man den auf alles Mögliche angewendeten Ausdruck „Modul“ für sie ebenfalls vorgeschlagen. Wir werden sie *Haupteinheit* des Systems nennen. Unter dem *reciproken Wert* der Grösse a , dargestellt durch das Zeichen a^{-1} , verstehen wir sodann, sofern a kein Teiler der Null ist, die gemeinsame Lösung der Gleichungen

$$(26) \quad az = e^0, \quad za = e^0.$$

Die Lösungen der Gleichungen (24) werden nunmehr dargestellt durch

$$(27) \quad x = a^{-1}b, \quad y = ba^{-1}.$$

Sind die Grössen a und b „vertauschbar“, d. h. besteht die Gleichung $ab = ba$, so sind diese Grössen x, y einander gleich. —

Der auseinandergesetzte Begriff eines Systemes complexer Grössen kann in der Weise erweitert werden, dass man die Forderungen I—III aufrecht erhält, die Forderung IV aber fallen lässt. Zu den besprochenen treten dann neue „Systeme ohne Haupteinheit“, auch mit einem die Vorstellung eines Grenzüberganges hervorrufenden und daher nicht ganz angemessenen Ausdruck „ausgeartete“ Systeme complexer Grössen genannt. In einem jeden solchen System ist bei jeder Wahl des Divisors immer mindestens eine Art der „Division“ eine unmögliche oder unbestimmte Operation.

8. Typen, Gestalten, Reducibilität. Aus den Darlegungen der vorigen Nummer geht hervor, dass alle Eigenschaften irgend eines besonderen Systems complexer Grössen völlig bestimmt sind durch das System der n^3 Constanten γ_{ixs} . Je nachdem man nun von vorn herein gewöhnliche complexe oder nur reelle Grössen zu n -tupeln vereinigt hat, wird man nun auch für die Constanten γ_{ixs} gewöhnliche complexe oder aber nur reelle Werte zulassen. Es ergibt sich hieraus das eine oder andere der beiden Probleme: „Man soll alle Systeme von gewöhnlichen complexen [reellen] Grössen γ_{ixs} finden, die den

Gleichungen (22) Genüge leisten, und ausserdem so beschaffen sind, dass keine der Determinanten (23) identisch verschwindet“. — Diese Aufgaben lassen eine noch präzisere Fassung zu. Es sind nämlich zugleich mit irgend einem System complexer Grössen in gewissem Sinn bekannt alle die, die aus ihm durch eine Änderung der Basis ($e_1 \dots e_n$), also durch andere Auswahl der Einheiten hervorgehen. Eine solche Änderung wird analytisch ausgedrückt durch eine lineare Transformation von nicht verschwindender Determinante,

$$(26) \quad e'_i = \sum^n c_{i\kappa} e_\kappa \quad (i, \kappa = 1, \dots, n),$$

wobei die $c_{i\kappa}$ im übrigen beliebige gewöhnliche complexe [reelle] Werte haben dürfen. Ferner ist mit einem gegebenen System zugleich bekannt das sogenannte *reciproke System* des ersten, ein System, das man erhält, wenn man je zwei Grössen $\gamma_{i\kappa s}$ und $\gamma_{\kappa i s}$ vertauscht. Man wird also alle diese durch einfache Transformationen auseinander hervorgehenden Systeme durch irgend eines unter ihnen repräsentieren können.

Wir rechnen zwei Systeme complexer Grössen zu demselben „Typus“, wenn sie durch Vertauschung der Constanten $\gamma_{i\kappa s}$ und $\gamma_{\kappa i s}$, und ebenso, wenn sie durch eine lineare Transformation (26) mit *gewöhnlichen complexen* Coefficienten $c_{i\kappa}$ aus einander hervorgehen. Wir sagen ferner, ein System mit reellen Constanten $\gamma_{i\kappa s}$, kürzer ein *reelles System complexer Grössen*, sei eine *reelle Gestalt* des Typus, dem es angehört; und wir betrachten zwei reelle Gestalten desselben Typus nur dann als verschieden, wenn sie *nicht* durch eine lineare Transformation (26) mit *reellen* Coefficienten $c_{i\kappa}$ und etwanige Vertauschung von $\gamma_{i\kappa s}$ mit $\gamma_{\kappa i s}$ aus einander hervorgehen. Die obigen Aufgaben können nunmehr so formuliert werden:

„Von jedem Typus von Systemen complexer Grössen mit n Einheiten einen Repräsentanten anzugeben.“

„Bei den Typen, die reelle Gestalten haben, von jeder Gestalt einen Repräsentanten anzugeben.“

Hat ein Typus nur eine einzige reelle Gestalt, so wird man natürlich diese auch als Repräsentanten des Typus selbst wählen.

Das so gestellte Problem lässt eine weitere Vereinfachung zu. Hat man nämlich zwei Systeme complexer Grössen mit n und m Einheiten ($e_1 \dots e_n$), ($\eta_1 \dots \eta_m$), so geht aus ihnen ein neues mit $n + m$ Einheiten $e_1 \dots e_n$, $\eta_1 \dots \eta_m$ hervor, wenn man zu den Multiplikationsregeln $e_i e_\kappa = \sum \gamma_{i\kappa s} e_s$, $\eta_i \eta_\kappa = \sum \delta_{i\kappa s} \eta_s$ der einzelnen Systeme noch die weiteren $e_i \eta_\kappa = \eta_\kappa e_i = 0$ ($i = 1 \dots n$, $\kappa = 1 \dots m$) hinzufügt. Hieraus ergibt sich ein Begriff der *Reducibilität* von Systemen com-

plexer Zahlen, oder vielmehr, es ergeben sich zwei solcher Begriffe. Wir sagen, ein System complexer Grössen sei „*reducibel*“ schlechthin, wenn vermöge einer linearen Transformation (26) mit *gewöhnlichen complexen* Coefficienten c_{ix} die Einheiten einer Basis auf mehrere Schichten derart verteilt werden können, dass alle Produkte von Einheiten der einen Schicht mit denen aller übrigen Schichten gleich Null sind; wir nennen das System *irreducibel* im entgegengesetzten Falle. Wir nennen ferner ein System mit *reellen* Constanten γ_{ix} „*reell-reducibel*“ oder „*reell-irreducibel*“, je nachdem sich eine solche in Schichten zerlegte Basis durch eine lineare Transformation (26) mit *reellen* Coefficienten c_{ix} einführen lässt oder nicht. Ein jedes System complexer Grössen (mit Haupteinheit) kann nur auf eine Weise in irreducibele Systeme zerlegt werden, wenn man von der bei der Wahl der Basis eines jeden Teilsystemes noch vorhandenen Willkür absieht, und ebenso jedes reelle System nur auf eine Weise in reell-irreducibele Systeme. Die Eigenschaften der Reducibilität oder Irreducibilität kommen allen Systemen eines Typus, und soweit reelle Systeme in Frage kommen, allen Systemen derselben Gestalt eines Typus in gleicher Weise zu. Um die obigen beiden Aufgaben für einen bestimmten Wert der Zahl n vollständig zu lösen, hat man daher nur aufzuzählen:

I. *Alle Typen irreducibeler Systeme, bei denen die Zahl der Einheiten $\leq n$ ist.*

II. *Alle verschiedenen reellen Gestalten dieser Systeme.*

III. *Alle reell-irreducibelen Gestalten von Typen reducibeler Systeme, bei denen die Zahl der Einheiten $\leq n$ ist.*

Die Lösung der dritten unter diesen Aufgaben lässt sich auf die der ersten zurückführen. Ist $(\eta_1 \dots \eta_m)$ die Basis eines irreducibelen Systemes mit den Multiplikationsregeln $\eta_i \eta_x = \sum \delta_{ixs} \eta_s$, so erhält man ein zweites System mit den m Einheiten $\vartheta_1 \dots \vartheta_m$, wenn man setzt $\vartheta_i \vartheta_x = \sum \bar{\delta}_{ixs} \vartheta_s$, und unter $\bar{\delta}_{ixs}$ den conjugiert-complexen Wert von δ_{ixs} versteht. Setzt man sodann $\eta_i \vartheta_x = 0$, und führt man die neuen Einheiten

$$(27) \quad e_x = \eta_x + \vartheta_x, \quad e_x^* = i(\eta_x - \vartheta_x)$$

ein, so ist das so entstehende reducibele System mit der Basis $(e_1 \dots e_m, e_1^* \dots e_m^*)$ reell und reell-irreducibel; und man findet alle unter III verlangten Gestalten, wenn man für $(\eta_1 \dots \eta_m)$ der Reihe nach je einen Repräsentanten eines jeden irreducibelen Typus setzt, dessen Basis $\frac{n}{2}$ oder weniger Einheiten enthält.

Es bleiben also zu lösen die Probleme I und II.

Es giebt ein einfaches *Kriterium der Reducibilität* eines vorgelegten Systemes complexer Grössen mit gewöhnlichen complexen oder auch reellen Constanten $\gamma_{i\kappa s}$: Bei jedem reducibelen [reellen und reell-reducibelen] System sind die Haupteinheiten der irreducibelen Teilsysteme solche Grössen, deren Quadrate ihnen selbst gleich sind, und die überdies mit allen Grössen des Systems vertauschbar sind. Ist umgekehrt in einem System mit n Einheiten $e_1 \dots e_n$ eine von e^0 verschiedene Grösse [reelle Grösse] ε vorhanden, für die

$$(28) \quad \varepsilon^2 = \varepsilon, \quad \varepsilon e_\kappa = e_\kappa \varepsilon \quad (\kappa = 1 \dots n),$$

so sind ε und $\eta = e^0 - \varepsilon$ die Haupteinheiten zweier (möglicher Weise wieder reducibeler) Teilsysteme; und diese Teilsysteme werden dadurch gefunden, dass man unter den Produkten εe_κ und den Produkten ηe_κ je ein System von linear-unabhängigen auswählt, und diese Grössen (deren Gesamtzahl gerade n beträgt) als neue Einheiten einführt¹⁴).

Ausser der eben geschilderten Operation des Nebeneinandersetzens der Einheiten zweier Systeme complexer Grössen giebt es noch ein anderes als „*Multiplikation zweier Systeme miteinander*“ bezeichnetes Verfahren, aus zwei solchen ein drittes herzuleiten¹⁵). Dieses besteht darin, dass man die formal gebildeten Produkte der Einheiten e_i, e'_j zweier Systeme als Einheiten $\eta_{ij} = e_i e'_j = e'_j e_i$ eines neuen Systems auffasst, und, wenn $e_i e_\kappa = \sum \gamma_{i\kappa s} e_s$, $e'_i e'_\kappa = \sum \gamma'_{i\kappa s} e'_s$ angenommen wird, die Produkte von zweien der neuen Einheiten gemäss der Formel

$$(29) \quad \eta_{i\kappa} \cdot \eta_{lm} = \sum_{s,t} \gamma_{i\kappa s} \gamma'_{lmt} \cdot \eta_{st}$$

auf diese Einheiten zurückführt.

Das Verfahren kommt darauf hinaus, dass man als Coordinaten $a_1 \dots a_n$ einer Grösse eines vorgelegten Systems statt reeller oder *gewöhnlicher* complexer Grössen überhaupt Grössen *irgend* eines be-

14) Vgl. hierzu *E. Study*, Gött. Nachr. 1889, p. 237; die obigen Begriffsbildungen und Problemen zu Grunde liegende Anschauungsweise rührt von *S. Lie* her [II A 6]; das Kriterium der Reducibilität von *G. Scheffers*, Math. Ann. 39 (1891), p. 293. Dort wird der Begriff des Typus etwas anders gefasst, als im Texte, aber ebenso wie hier bei *S. Lie* u. *Scheffers*, Cont. Gruppen, Leipzig 1893.

15) Obige Ausdrucksweise braucht *Scheffers* a. a. O. Die Operation selbst ist schon von *W. K. Clifford* in ausgedehntem Masse verwendet worden: Am. J. of Math. 1 (1878), p. 350 = Math. Papers (London 1883) Nr. 30. Vgl. dazu *H. Taber*, Am. J. of Math. 12 (1890), p. 337, insbesondere § 25. Die zuletzt genannte Abhandlung ist besonders geeignet zur Orientierung über die eigentümliche Anschauungsweise und Terminologie der englisch-amerikanischen Mathematiker.

stimmten zweiten Systems nimmt. Der Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des als „Produkt“ (Compound) bezeichneten, abgeleiteten Systems und den Eigenschaften der beiden gegebenen Systeme ist nicht einfach. Doch ergeben sich mehrere für Anwendungen besonders geeignete Systeme complexer Grössen gerade auf diese Weise.

9. Systeme mit zwei, drei und vier Einheiten. Wir erläutern die Begriffsbildungen der vorigen Nummer durch Aufzählung aller möglichen Systeme complexer Grössen mit zwei, drei oder vier Einheiten.

Systeme mit zwei Einheiten.

Es giebt nur drei reelle Systeme mit zwei Einheiten, die sämtlich das commutative Gesetz der Multiplikation befolgen. Die zugehörigen Multiplikationsregeln sind, nach geeigneter Wahl der Basis, diese:

$$(30) \quad e_0^2 = e_0, \quad e_0 e_1 = e_1 e_0 = e_1, \quad e_1^2 = e_0,$$

$$(31) \quad e_0^2 = e_0, \quad e_0 e_1 = e_1 e_0 = e_1, \quad e_1^2 = -e_0,$$

$$(32) \quad e_0^2 = e_0, \quad e_0 e_1 = e_1 e_0 = e_1, \quad e_1^2 = 0. \quad {}^{16)}$$

Von diesen ist nur das letzte, das aus den beiden ersten durch einen Grenzübergang hergeleitet werden kann, irreducibel. Das zweite System (31) ist das der gewöhnlichen complexen Grössen; es ist *reducibel, aber reell-irreducibel* nach der Definition der Nr. 8. Es geht in das erste System (30) über durch die imaginäre Substitution $e_0' = e_0$, $e_1' = ie_1$. Die Systeme (30) und (31) sind also zwei verschiedene reelle Gestalten eines und desselben Typus (während (32) einen anderen Typus repräsentiert). Die erste dieser Gestalten, (30), ist reell-reducibel; denn führt man die neuen Einheiten $e_1' = \frac{1}{2}(e_0 + e_1)$, $e_2' = \frac{1}{2}(e_0 - e_1)$ ein, so erhält man die Multiplikationsregeln:

$$(30b) \quad e_1'^2 = e_1', \quad e_1' e_2' = e_2' e_1' = 0, \quad e_2'^2 = e_2'.$$

Das System der gewöhnlichen complexen Grössen tritt hiernach in der allgemeinen Theorie der complexen Grössen an zwei verschiedenen Stellen auf. Bei Aufzählung der Typen irreducibeler Systeme erscheint es als das einzige System mit einer Einheit ($e_0^2 = e_0$); bei Aufzählung der reellen und reell-irreducibelen Systeme erscheint es unter den Systemen mit zwei Einheiten.

Von Systemen mit drei und vier Einheiten zählen wir nur die

16) S. Pincherle nach Vorlesungen von Weierstrass, Giorn. di mat. 18 (1880), p. 205, wo allerdings das dritte System nicht ausdrücklich aufgeführt wird, und A. Cayley, Lond. Math. Proc. 15 (1883—84), p. 185.

irreducibelen und reell-irreducibelen auf¹⁷⁾. Wir stellen ihre Multiplikationsregeln in Gestalt quadratischer Tafeln zusammen. e_0 bedeutet in jedem Falle die Haupteinheit; der Wert des Produktes $e_i e_x$ ist in der Horizontalreihe enthalten, die links e_i , und in der Verticalreihe, die oben e_x enthält.

(33) *Irreducibele Systeme mit drei Einheiten.*

	e_0	e_1	e_2		e_0	e_1	e_2		e_0	e_1	e_2
I.	e_1	e_2	0,	II.	e_1	e_0	e_2 ,	III.	e_1	0	0.
	e_2	0	0		e_2	$-e_2$	0		e_2	0	0

(34) *Irreducibele Systeme mit vier Einheiten.*

	e_0	e_1	e_2	e_3		e_0	e_1	e_2	e_3		e_0	e_1	e_2	e_3	
I.	e_1	\bar{e}_2	e_3	0		II.	e_1	e_0	e_2	e_3	III.	e_1	e_3	e_3	0
	e_2	e_3	0	0	,		e_2	$-e_2$	0	0		e_2	$-e_3$	ce_3	0
	e_3	0	0	0			e_3	e_3	0	0		e_3	0	0	0
IV a.	e_0	e_1	e_2	e_3		IV b.	e_0	e_1	e_2	e_3	V.	e_0	e_1	e_2	e_3
	e_1	e_3	0	0			e_1	e_3	0	0		e_1	e_2	0	0
	e_2	0	e_3	0	,		e_2	0	$-e_3$	0		e_2	0	0	0
	e_3	0	0	0			e_3	0	0	0		e_3	0	0	0
VI a.	e_0	e_1	e_2	e_3		VI b.	e_0	e_1	e_2	e_3	VII a.	e_0	e_1	e_2	e_3
	e_1	$-e_0$	e_3	$-e_2$,		e_1	e_0	e_3	e_2		e_1	$-e_0$	e_3	$-e_2$
	e_2	$-e_3$	$-e_0$	e_1	,		e_2	$-e_3$	e_0	$-e_1$		e_2	$-e_3$	0	0
	e_3	e_2	$-e_1$	$-e_0$			e_3	$-e_2$	e_1	$-e_0$		e_3	e_2	0	0
VII b.	e_0	e_1	e_2	e_3		VIII.	e_0	e_1	e_2	e_3	IX.	e_0	e_1	e_2	e_3
	e_1	e_0	e_3	e_2			e_1	0	e_3	0		e_1	e_0	e_2	e_3
	e_2	$-e_3$	0	0	,		e_2	$-e_3$	0	0		e_2	$-e_2$	0	0
	e_3	$-e_2$	0	0			e_3	0	0	0		e_3	$-e_3$	0	0
X.	e_0	e_1	e_2	e_3		$\left\{ \begin{array}{cccc} e_0 & e_1 & e_2 & e_3 \\ e_1 & -e_0 & e_3 & -e_2 \\ e_2 & e_3 & 0 & 0 \\ e_3 & -e_2 & 0 & 0 \end{array} \right\}$					$\left. \begin{array}{l} 2e_0' = e_0 + ie_1, \\ 2e_1' = e_2 + ie_3, \\ 2e_2' = e_0 - ie_1, \\ 2e_3' = e_2 - ie_3. \end{array} \right\}$				
	e_1	0	0	0											
	e_2	0	0	0											
	e_3	0	0	0											

17) E. Study, Gött. Nachr. 1889, p. 237. Monatsh. f. Math. 1 (1890), p. 283.

Verwandte Untersuchungen hatte bereits 1870 B. Peirce angestellt: Am. J. of Math. 4 (1881) p. 97. Indessen ist dieser Autor nicht zu einer erschöpfenden Aufzählung der Systeme mit drei und vier Einheiten gelangt.

Die Typen sind durch römische Ziffern unterschieden, die verschiedenen Gestalten eines und desselben Typus durch diesen angehängte Indices a, b . Das zuletzt (ohne Nummer) angeführte System repräsentiert die einzige reell-irreducibele Gestalt eines reducibelen Typus, die bei vier Einheiten vorkommt. Es wird zerlegt durch Einführung der neuen Einheiten e'_i . Jedes dieser Systeme, mit Ausnahme von II, kann durch Einführung neuer Einheiten in sein reciprokes System übergeführt werden. I, IV, V und X haben das commutative Gesetz der Multiplikation. Die Tafel III stellt unendlich viele verschiedene Typen dar, entsprechend den verschiedenen Werten des Parameters c , darunter alle bei vier Einheiten vorhandenen Typen ohne reelle Gestalt, entsprechend den imaginären Werten von c . VIa ist das von *Hamilton* 1843 entdeckte System der *Quaternionen*. VIa und VIIa gehen in die Gestalten VIb und VIIb über durch die imaginäre Substitution

$$e'_0 = e_0, \quad e'_1 = ie_1, \quad e'_2 = ie_2, \quad e'_3 = -e_3,$$

ebenso IVa in IVb durch Einführung von $c'_2 = ie_2$ an Stelle von e_2 .

10. Spezielle Systeme mit n^2 Einheiten. Bilineare Formen.

Besonders untersucht worden ist eine Klasse von Systemen complexer Grössen mit einer quadratischen Zahl von Einheiten, die aus der Theorie der linearen Transformationen entspringt. Durch jedes System von n^2 reellen oder gewöhnlichen complexen Grössen a_{ix} ($i, x = 1 \dots n$) — also durch eine (quadratische) sogenannte *Matrix* $\|a_{ix}\|$ [Art. I B 1 b] — ist eine *lineare Transformation*

$$(35) \quad y_x = \sum_1^n a_{ix} x_i \quad (x = 1 \dots n)$$

bestimmt (deren Determinante $|a_{ix}|$ hier nicht notwendig als von Null verschieden vorausgesetzt wird), und ebenso eine *bilineare Form* [I B 1 b]

$$(36) \quad A = \sum_1^n \sum_1^n a_{ix} x_i u_x.$$

Führt man nun die zu einer zweiten Matrix von n^2 Elementen $\|b_{ix}\|$ oder einer bilinearen Form B gehörige lineare Transformation nach der ersten aus, so entsteht eine neue lineare Transformation, zugehörig zu der Matrix $\|c_{ix}\|$ und der bilinearen Form C , wobei

$$(37) \quad c_{ij} = \sum_1^n a_{ix} b_{xj},$$

$$(38) \quad C = \sum_i \sum_j c_{ij} x_i u_j = \sum_x \frac{\partial A}{\partial u_x} \frac{\partial B}{\partial x_x}.$$

Die Regel, wonach hier aus zwei Matrices oder bilinearen Formen eine dritte hergeleitet wird, nennt man „Zusammensetzung“, „Composition“ oder auch „Multiplikation“ der Matrices oder bilinearen Formen. Man drückt den Inhalt der Formel (38) durch die symbolische Gleichung

$$(39) \quad A \cdot B = C$$

aus, und nennt die Form C das — in der Reihenfolge A, B genommene und von $B \cdot A$ zu unterscheidende — (sog. symbolische) *Produkt* von A und B . Offenbar ist diese Regel ganz identisch mit der Multiplikationsregel eines Systems complexer Grössen mit n^2 Einheiten e_{ix} . Setzt man

$$(40) \quad e_{ix}e_{im} = 0 \quad (x \neq l), \quad e_{ix}e_{xl} = e_{ii},$$

so sagen die obigen Formeln dasselbe aus, wie die Gleichung

$$(41) \quad \left(\sum a_{ix}e_{ix}\right)\left(\sum b_{ix}e_{ix}\right) = \sum c_{ix}e_{ix}.^{18)}$$

Es gelten daher auch alle bei dem Rechnen mit einem System complexer Grössen überhaupt anzuwendenden Regeln insbesondere für das Rechnen mit bilinearen Formen, soweit man auf solche keine anderen Operationen als die Addition, die Multiplikation mit numerischen (reellen oder gewöhnlichen complexen) Grössen, und die oben definierte Multiplikation zweier bilinearer Formen miteinander anwendet¹⁹⁾. Aber auch umgekehrt lassen sich die in der Theorie der

18) Für den Fall $n = 3$ wird das obige System complexer Grössen von Mathematikern englischer Zunge als System der *Nonionen* bezeichnet. S. darüber *C. S. Peirce*, Johns Hopkins Circular, Baltimore 1882, Nr. 22; *J. J. Sylvester* ebenda Nr. 27. Vgl. auch Anm. 15. — Im allgemeinen Falle brauchen *Sylvester* u. A. für den besonderen Zweig der Algebra, der von der Zusammensetzung bilinearer Formen handelt, den Ausdruck *Universal Algebra*.

19) Die Zusammensetzung der Matrices ist so alt, als die Theorie der linearen Transformationen selbst; das obige specielle System complexer Grössen tritt auf, wo immer man es mit linearen Transformationen zu thun hat. Das Wesentliche an der im Text dargelegten Auffassung liegt aber darin, dass der ganze Complex von n^2 Grössen a_{ix} als etwas Einheitliches angesehen und durch ein solches *Zeichen* dargestellt wird, das dem distributiven und associativen Gesetz der „Multiplikation“ einen formal einfachen und leicht zu handhabenden Ausdruck verleiht. Diese Auffassung findet sich angedeutet schon bei *Hamilton* (Lectures), klar und deutlich bei *Cayley* (Lond. Trans. v. 148 [1858], 1859, p. 17 = Coll. Math. Papers 2, p. 475); *Cayley* muss daher wohl als Begründer dieser Theorie angesehen werden. Nach *Cayley* haben viele Mathematiker sich derselben Begriffsbildungen bedient. Für uns kommen insbesondere in Betracht Arbeiten von *Edm. Laguerre* (Ec. Polyt. t. 25, 1867, p. 215), *G. Frobenius* (J. f. Math. 84, 1878, p. 1 — die gründlichste Untersuchung über diesen Gegenstand —), *Sylvester* (Johns Hopkins Circular, Baltimore 1883, Nr. 27, 1884, Nr. 28; Am.

bilinearen Formen gewonnenen Sätze auf beliebige Systeme complexer Grössen anwenden. Die Multiplikationsregeln eines solchen Systems sind nämlich selbst nichts anderes als der Ausdruck für die Regeln der Zusammensetzung gewisser *specieller* bilinearer Formen: setzt man, von irgend einem vorgelegten System mit n Einheiten und mit den Multiplikationsregeln $e_i e_x = \sum \gamma_{ixs} e_s$ ausgehend

$$(42) \quad A_i = \sum_{s,t} x_s \gamma_{sit} u_t \quad (i = 1 \dots n),$$

so folgt $A_i A_x = \sum \gamma_{ixs} A_s$.²⁰⁾ Die oben betrachteten speciellen Systeme mit n^2 Einheiten enthalten also, wenn man die Zahl n unbestimmt lässt, alle anderen. Offenbar kann man in derselben Weise aus jeder linearen Schaar bilinearer Formen, sofern die Produkte von je zwei Formen der Schaar selbst angehören, ein System complexer Grössen mit oder ohne Haupteinheit herleiten. So stimmt das System (40) selbst im Falle $n = 2$ mit den *Quaternionen* in ihrer zweiten reellen Gestalt VIIb überein, wie man erkennt, wenn man statt der Produkte $x_i u_x$ die vier ebenfalls linear-unabhängigen Formen

$$(43) \quad \begin{aligned} A_0 &= x_1 u_1 + x_2 u_2, & A_1 &= -x_1 u_2 - x_2 u_1 \\ A_2 &= -x_1 u_1 + x_2 u_2, & A_3 &= x_2 u_1 - x_1 u_2 \end{aligned}$$

als „Einheiten“ einführt²¹⁾; dieselbe Multiplikationstafel VIb ergibt sich aber nach Obigem u. a. auch, wenn man das folgende System von vier bilinearen Formen

$$(44) \quad \begin{aligned} B_0 &= x_0 u_0 + x_1 u_1 + x_2 u_2 + x_3 u_3, & B_1 &= x_0 u_1 + x_1 u_0 - x_2 u_3 - x_3 u_2, \\ B_2 &= x_0 u_2 + x_1 u_3 + x_2 u_0 + x_3 u_1, & B_3 &= x_0 u_3 + x_1 u_2 - x_2 u_1 - x_3 u_0 \end{aligned}$$

zu Grunde legt. —

Unter den (symbolischen) *Potenzen* A , $A^2 = AA$, $A^3 = AAA$ u. s. w. einer bilinearen Form

$$A = \sum_{i,x}^n a_{ix} x_i u_x$$

J. of Math. 6, 1884, p. 270), *Ed. Weyr* (Monatsh. f. Math. 1889, p. 187) und *H. Taber* (Am. J. of Math. 12, 1890, p. 337; 13, 1891, p. 159). Da die genannten Autoren zum Teil unabhängig von einander gearbeitet haben, so haben die Hauptsätze in dieser Theorie mehrere Entdecker.

20) *Ed. Weyr*, Prag. Ber. v. 25. Nov. 1887. In anderer Form ist der Satz zuvor schon von *C. S. Peirce* ausgesprochen worden (Mem. of the Am. Acad. of Arts and Sciences 9, 1870. Am. J. of Math. 4, 1881, p. 221). Vgl. dazu *Johns Hopkins Circular* Nr. 13 (1882), Nr. 22 (1883).

21) *Laguerre* a. a. O. p. 230. *Cayley*, Math. Ann. 15 (1879), p. 238. *B. u. C. S. Peirce*, Am. J. of Math. 4 (1881); *Johns Hopkins Circ.* Nr. 22 (1883). *Cyp. Stéphanos*, Math. Ann. 22 (1883), p. 299.

befinden sich höchstens n linear-unabhängige, d. h. solche, zwischen denen keine für alle Wertsysteme der Grössen x_i, u_i gültige lineare Gleichung mit numerischen (reellen oder gewöhnlichen complexen) Coefficienten (Funktionen der a_{ix}) stattfindet. Rechnet man, wie gebräuchlich, zu diesen Potenzen als nullte die sogenannte „Einheitsform“

$$(45) \quad E = x_1 u_1 + x_2 u_2 + \dots + x_n u_n,^{22)}$$

so kann man immer die n^{te} Potenz von A durch die vorausgehenden Potenzen ($A^0 = E, A^1 = A, A^2, A^3, \dots A^{n-1}$) ausdrücken. Man bildet zu diesem Zweck, unter r einen unbestimmten Parameter verstehend, die Determinante der bilinearen Form $r \cdot E - A$,

$$(46) \quad \varphi(r) = |rE - A| = \\ = r^n + a_1 r^{n-1} + \dots + a_n r^0 = (r - r_1)(r - r_2) \dots (r - r_n),$$

eine ganze Funktion n^{ten} Grades von r mit reellen oder gewöhnlichen complexen Coefficienten. Ersetzt man nun in dem Ausdruck von $\varphi(r)$ r durch A , d. h. r^0 durch $E = A^0$, r^1 durch A , r^2 durch das (symbolische) Quadrat von A , u. s. w., so findet sich $\varphi(A) = 0$.²³⁾ Der Ausdruck $\varphi(r)$ wird, unter Entlehnung eines Ausdruckes von *Cauchy*, nach *Frobenius* die „charakteristische Funktion“ der Form A genannt; die Gleichung $\varphi(r) = 0$ heisst entsprechend die „charakteristische Gleichung“²⁴⁾. Diese Gleichung ist die Gleichung niedrigsten Grades, der die Form A genügt, so lange die Grössen a_{ix} unbestimmt sind. Die Gleichung niedrigsten Grades, der eine Form A mit irgendwie spezialisierten Coefficienten a_{ix} genügt,

$$(47) \quad \psi(A) = A^p + a_1 A^{p-1} + \dots + a_p A^0 = 0 \quad (p \leq n),$$

wird von *Weyr* die „Grundgleichung“, von anderen die „reducierte charakteristische Gleichung“ der Form A (oder der Matrix $\|a_{ix}\|$) genannt. Um die zugehörige ganze Funktion $\psi(r)$ zu bilden, bestimme man den grössten gemeinsamen Teiler $\vartheta(r)$ aller Unterdeterminanten $(n-1)^{\text{ten}}$ Grades der Determinante $|rE - A|$. Es ist dann

22) Diese Bezeichnung nach *Frobenius*. Die entsprechende Matrix wird *Einheitsmatrix* oder *Scalarmatrix* genannt. Die entsprechende complexe Grösse des Systems (40) ist die Haupteinheit dieses Systems.

23) Dieser Hauptsatz der Theorie ist von *Cayley* (a. a. O.) behauptet und an einem Beispiel ($n = 3$) verificiert worden. Bewiesen haben ihn *Laguerre*, *Frobenius*, *Ed. Weyr* u. *H. Taber* (s. Anmerk. 19), ausserdem *M. Pasch* (Math. Ann. 38, 1891, p. 48), *A. Buchheim* (Lond. M. S. Proc. 16, 1885, p. 63), *Th. Molien* (Math. Ann. 41, 1893, p. 83), endlich *Frobenius*, Berl. Ber. 1896, p. 601. Der principiell einfachste Beweis ist der zweite von *Frobenius*.

24) Bei *Sylvester* u. a. heisst die Gleichung (46) „latent equation“, ihre Wurzeln $r_1 \dots r_n$ heissen „latent roots“ (der Matrix $\|a_{ix}\|$).

$$(48) \quad \psi(r) = \frac{\varphi(r)}{\delta(r)}^{25}.$$

Bei beliebigen Systemen complexer Grössen bilden Grad und Beschaffenheit der niedrigsten algebraischen Gleichung, der eine allgemein gewählte Zahl a eines bestimmten Systems genügt, eines der Hilfsmittel, deren man sich zur Klassifikation dieser Gebilde bedient¹⁷⁾. Der bei jedem vorgelegten System völlig bestimmte Grad p dieser Gleichung wird nach *Scheffers* „Grad“, nach *Molien* „Rang“ des Systems genannt; die Gleichung $\psi(a) = 0$ selbst heisst bei *Scheffers* die „charakteristische Gleichung“, bei *Molien* die „Ranggleichung“ des Systems²⁶⁾. So hat bei dem System (40) mit n^2 Einheiten der Rang den Wert n , und die Gleichung $\varphi(r) = 0$ (46) ist die Ranggleichung dieses Systems. Von den irreduciblen Systemen mit drei Einheiten (33) hat I den Rang 3, II und III haben den Rang 2; von denen mit vier Einheiten (34) hat I den Rang 4, II—V haben den Rang 3, VI—X den Rang 2. Die Ranggleichung der Quaternionen (34, VIa) z. B. lautet, wenn $a = a_0 e_0 + a_1 e_1 + a_2 e_2 + a_3 e_3$ gesetzt wird,

$$r^2 - 2a_0 \cdot r + (a_0^2 + a_1^2 + a_2^2 + a_3^2) = 0. \quad -$$

Die linke Seite der Ranggleichung eines reduciblen Systems ist gleich dem Produkt aus den linken Seiten der Ranggleichungen seiner einzelnen irreduciblen Bestandteile. Es lassen sich daher alle Systeme complexer Grössen mit n Einheiten angeben, deren Rang den grössten möglichen Wert n erreicht. Ihre irreduciblen Bestandteile haben einzeln wiederum die genannte Eigenschaft, und alle, die aus der gleichen Zahl m ($\leq n$) von Einheiten gebildet sind, gehören einem einzigen Typus an; die Multiplikationsregeln eines solchen irreduciblen Systems mit den Einheiten $e_0 \dots e_{m-1}$ lassen sich auf die Form bringen:

$$(49) \quad e_i e_x = e_{i+x} \quad (i + x \leq m - 1), \quad e_i e_x = 0 \quad (i + x > m - 1).^{27)}$$

11. Spezielle Systeme mit commutativer Multiplikation. Die zuletzt betrachteten Systeme complexer Grössen mit n Einheiten bilden

25) *Frobenius*, J. f. Math. 84; andere Beweise sind gegeben worden von *Ed. Weyr* (a. a. O.) und von *Frobenius*, Berl. Ber. 1896, p. 601.

26) *Scheffers*, Math. Ann. 39 (1891), p. 293, *Molien*, ebenda 41 (1893), p. 83. — Die „charakteristische Gleichung eines Systems“ ist nicht zu verwechseln mit der „charakteristischen Gleichung“ einer Grösse a des Systems, der Gleichung $\varphi(r) = 0$, die zu der entsprechenden bilinearen Form gehört.

27) *Study*, Gött. Nachr. 1889, p. 62 und Monatsh. f. Math. 2 (1890), p. 23. Andere Beweise bei *Scheffers*, Math. Ann. 39, p. 293, und bei *G. Sforza*, Giorn. di mat. 32—34 (1894—96), pp. 293, 80, 252.

eine sehr specielle Klasse unter denen, die das commutative Gesetz der Multiplikation befolgen. Unter ihnen sind die einfachsten die Systeme, deren irreducibele Bestandteile nur je eine Einheit enthalten; also die zu dem Typus

$$(50) \quad e_i^2 = e_i, \quad e_i e_\kappa = 0 \quad (i \neq \kappa, i, \kappa = 1, 2 \dots n)$$

gehörigen Systeme. Auf diese Systeme, und ihre verschiedenen nach dem Satz in Nr. 8 ohne weiteres anzugebenden reellen Gestalten ist man gekommen durch eine Untersuchung über den inneren Grund der ausgezeichneten Stellung, die wir dem System der gemeinen complexen Grössen zuschreiben. Man hat dabei angeknüpft an eine Stelle bei Gauss²⁸⁾, der in Aussicht gestellt hatte, die Frage zu beantworten: „*Warum die Relationen zwischen Dingen, die eine Mannigfaltigkeit von mehr als zwei Dimensionen darbieten, nicht noch andere in der allgemeinen Arithmetik zulässige Arten von Grössen liefern können*“. Bedenkt man, dass die heute auf vielfältige Weise verwendeten gewöhnlichen complexen Grössen doch hauptsächlich und ursprünglich *nur* deshalb in die Analysis eingeführt worden sind, weil man mit ihrer Hülfe gewissen Sätzen allgemeine Gültigkeit und anderen eine einfachere Ausdrucksweise geben konnte, so entsteht die Frage, ob der Erweiterungsprocess, der von dem Gebiete der reellen Grössen in das Gebiet der gemeinen complexen Grössen führt, hiermit abgeschlossen ist, oder ob nicht das genannte Bedürfnis zu ferneren in gleichem Sinne berechtigten Erweiterungen des Gebietes der „allgemeinen Arithmetik“ Anlass giebt.

Um die Zeit 1863 hat Weierstrass in einer an der Universität Berlin gehaltenen öffentlichen Vorlesung „über complexe Zahlgrössen“ den Satz bewiesen, dass bei einem jeden (nach unserer Terminologie) reellen System complexer Grössen mit commutativer Multiplikation ein Produkt $a \cdot b$ verschwinden kann, ohne dass einer der Faktoren verschwindet, es sei denn, dass das betrachtete System nur eine Einheit ($e_0^2 = e_0$) enthält, oder mit dem aus zwei Einheiten gebildeten System der gemeinen complexen Grössen zusammenfällt²⁸⁾. Ein ähnlicher Satz gilt, nach Frobenius und C. S. Peirce, auch dann, wenn man das commutative Gesetz der Multiplikation nicht fordert: zu den genannten beiden Systemen kommen dann noch die reellen Quaternionen (VIa)²⁹⁾. Wenn man es also für unzulässig erklärt, dass eine

28) Nach mündlicher Mitteilung von H. A. Schwarz. Vgl. auch E. Kossak, Elemente der Arithmetik (Berl. 1882, Friedr. Werd. Gymn. Progr.). Ein von H. Hankel veröffentlichter Satz (a. a. O.) ist in dem oben angeführten enthalten.

29) Frobenius, J. f. Math. 84 (1878), p. 59. C. S. Peirce, Am. J. of Math 4 (1881), p. 225.

algebraische Gleichung (z. B. $ax + b = 0$) mit von Null verschiedenen Coefficienten unendlich viele Wurzeln haben kann, und wenn man auch das commutative Gesetz der Multiplikation nicht verletzen will, so bleiben zulässig nur die gewöhnlichen complexen Grössen. —

Etwas geringere Anforderungen an die in der „allgemeinen Arithmetik“ zulässigen Grössen hat *Weierstrass* in einer Veröffentlichung aus dem Jahre 1884 gestellt³⁰⁾. Er betrachtet auch hier nur Systeme mit commutativer Multiplikation, ohne dabei von vornherein die Existenz einer Haupteinheit (nach unserer Terminologie) anzunehmen. Da in jedem solchen System eine algebraische Gleichung n^{ten} Grades, deren Coefficienten alle aus einem und demselben Teiler der Null durch Multiplikation mit irgend welchen Grössen des Systems hervorgehen, unendlich viele Wurzeln haben kann, so stellt er die Frage nach allen den Systemen, bei denen *nur* solche besondere Gleichungen unendlich viele Wurzeln zulassen. Diese Frage wurde von ihm unter Zuziehung mehrerer weiterer Voraussetzungen, und von *R. Dedekind*³¹⁾ allgemein dahin beantwortet, dass nur die verschiedenen reellen Gestalten des Typus (50) diese Eigenschaft besitzen. *Dedekind* zeigte ausserdem, dass diese Systeme vor allen anderen durch das Nicht-Verschwinden der aus den Constanten γ_{irs} gebildeten Determinante

$$(51) \quad \left| \sum_{r,s} \gamma_{irs} \gamma_{rs} \right|$$

ausgezeichnet sind. Bei dieser Art der Fragestellung ergeben sich also ausser dem System der gemeinen complexen Grössen noch andere, aber nur triviale Systeme, nämlich solche, deren Rechnungsregeln lediglich Wiederholungen der Rechnungsregeln sind, die schon bei den reellen und den gewöhnlichen complexen Grössen vorkommen. Aus diesem Grunde erklärt *Weierstrass* die genannten Systeme zwar nicht für unzulässig, aber für überflüssig. Anderer Ansicht ist *Dedekind*. Er zeigt, dass die innerhalb der Theorie der gewöhnlichen complexen Grössen auftretenden und längst eingebürgerten algebraischen Zahlen (I C 4) bei geeigneter Auffassung genau dieselben Eigenschaften darbieten, wie die Grössen der Systeme (50). Nach ihm sind also diese Systeme weder unzulässig, noch überflüssig, sie entbehren aber des Charakters der Neuheit. — Dasselbe lässt sich übrigens noch

30) Gött. Nachr. 1884, p. 396 u. ff. Dazu *H. A. Schwarz*, ebenda p. 516, *O. Hölder* 1886, p. 241, *J. Petersen* 1887, p. 489. Vgl. Anm. 14.

31) Gött. Nachr. 1885, p. 141, u. 1887, S. 1. Dazu *Frobenius*, Berl. Ber. 1896, p. 601. *D. Hilbert*, Gött. Nachr. 1896, p. 179. *Study*, ebenda 1898, p. 1.

in einem anderen Sinne behaupten. Auch gewisse längst untersuchte Systeme bilinearer Formen unterscheiden sich nur in der Bezeichnung von den Systemen (50), und namentlich ist die von *Weierstrass* und seinen Nachfolgern behandelte Reduktion eines „zulässigen“ Systems auf die Basis ($e_1 \dots e_n$) (Reduktion auf die „Teilgebiete“ nach *Weierstrass*) eine aus der Theorie der bilinearen Formen wohlbekannte Operation³²⁾.

Eingehendere Untersuchungen über die möglichen Typen von Systemen mit commutativer Multiplikation liegen zur Zeit noch nicht vor. Eine gewisse Einsicht in die Struktur dieser Systeme wird eröffnet durch mehrere Sätze von *G. Scheffers* und *Th. Molien* (a. a. O.), sowie durch einen von *G. Frobenius*³²⁾ aufgestellten Satz: „Sind A und B zwei miteinander vertauschbare bilineare Formen (oder auch vertauschbare Grössen irgend eines Systems), so sind die Wurzeln der charakteristischen Gleichung der Form $\lambda A + \mu B$ lineare Funktionen der Parameter λ und μ .“ —

L. Kronecker hat umfangreiche, sehr abstrakt gehaltene Untersuchungen angestellt über den Zusammenhang der Systeme mit commutativer Multiplikation mit der von ihm begründeten Theorie der Modulsysteme [I B 1 c]. Er geht von der Bemerkung aus, dass die linken Seiten der Definitionsgleichungen

$$e_i e_n - \sum \gamma_{ins} e_s = 0 \quad (\gamma_{ins} = \gamma_{nis})$$

nach Ersetzung der Einheiten e_i durch unbestimmte Grössen y_i ein Modulsystem bilden, und er zeigt, dass umgekehrt jedes Modulsystem von bestimmter besonderer Beschaffenheit zur Entstehung eines Systems complexer Grössen Anlass giebt³³⁾.

12. Complexe Grössen und Transformationsgruppen. Wir wenden uns nun zur Betrachtung des Zusammenhangs der Systeme complexer Grössen mit gewissen *Transformationsgruppen* (vgl. Nr. 6). Fasst man in den durch die Multiplikationsregeln (21) irgend eines Systems complexer Grössen näher erklärten Gleichungen

$$(52) \quad x' = ax, \quad x' = xb$$

die Coordinaten x_i der complexen Grösse x als unabhängige Veränderliche auf, die Coordinaten x'_i von x' als abhängige Veränderliche, endlich die Coordinaten a_i und b_i der Grössen a und b als Parameter, so stellt jede der beiden Gleichungen (52) eine continuierliche und zwar

32) *Study*, Gött. Nachr. 1889, p. 265. Vgl. *Frobenius*, Berl. Ber. 1896, p. 601.

33) Berl. Ber. 1888, I. p. 429, 447, 557, 595; II. p. 983.

n-gliedrige Gruppe von linearen Transformationen vor³⁴), eine Untergruppe der von *S. Lie* so genannten linearen homogenen Gruppe [II A 6]; andere Gruppen — Untergruppen der sog. allgemeinen linearen Gruppe — werden in entsprechender Weise dargestellt durch die Gleichungen:

$$(53) \quad x' = x + c, \quad x' = ax + c, \quad x' = xb + c, \quad x' = axb + c.$$

Führt man in die Gleichungen der letzten und umfassendsten unter diesen Gruppen (durch eine nicht-lineare Transformation) neue Veränderliche ein, so erhält man neue Gruppen, bei denen an Stelle des commutativen Gesetzes der Addition und des distributiven und associativen Gesetzes der Multiplikation gewisse Funktionalgleichungen treten. *Fr. Schur* hat gezeigt, dass auch umgekehrt jede Gruppe, deren Transformationen diesen Funktionalgleichungen genügen, durch Einführung von geeigneten Veränderlichen und Parametern in die Form $x' = axb + c$ gesetzt werden kann³⁵).

Die beiden projektiven *n*-gliedrigen Gruppen (52) bilden, nach der Terminologie von *S. Lie*, ein Paar von einfach-transitiven, sogenannten reciproken Gruppen [II A 6]. Sie sind aber nur *specielle* Gruppen dieser Art, da sie (mindestens) eine eingliedrige Untergruppe ($a = \lambda e^0$, $b = \lambda e^0$) mit einander gemein haben. Fasst man jedoch, abweichend von der oben gemachten Annahme, die Veränderlichen x_i , x'_i wie auch die Parameter a_x , b_x als Verhältnissgrössen (sogenannte *homogene* Grössen) auf, so verschwindet dieser specielle Charakter: Man erhält *jeden* „Typus“ von Paaren reciproker projektiver Gruppen eines Raumes von $n - 1$ Dimensionen, und jeden Typus nur einmal, wenn man an Stelle des oben unbestimmt gelassenen Systems complexer Grössen der Reihe nach Repräsentanten eines jeden Typus von Systemen mit n Einheiten setzt³⁶). Es ist also zugleich mit den unter Nr. 7 und Nr. 8 besprochenen Problemen ein bestimmtes Problem aus der Theorie der Transformationsgruppen gelöst.

Umfassendere Anwendungen der Systeme complexer Grössen auf die Theorie der Transformationsgruppen ergeben sich aus der besonderen analytischen Darstellung der — zufolge der getroffenen Festsetzung — $(n - 1)$ -gliedrigen reciproken Gruppen $x' = ax$, $x' = xb$.

34) Zuerst bemerkt von *H. Poincaré*: Par. C. R. 99 (1884), p. 740. Vgl. zu dieser Arbeit *Lie* u. *Scheffers* a. a. O. p. 621.

35) Math. Ann. 33 (1888) p. 49.

36) *Study*, Leipz. Ber. 1889, p. 177 = Monatsh. f. Math. 1 (1890), p. 283. *Lie* und *Scheffers*, Cont. Gruppen (Leipzig 1893) Kap. 21; siehe wegen der allgemeinen Theorie der reciproken Gruppen *Lie* und *Engel*, Theorie der Transformationsgruppen I (Leipzig 1888), Kap. 21. Vergleiche überall Art. II A 6.

Diese Gruppen sind nämlich zugleich ihre eigenen Parametergruppen. Führt man nach den obigen Transformationen die folgenden aus: $x'' = a'x'$, $x'' = x'b'$, so folgt $x'' = a''x$, $x'' = xb''$, wo

$$(54) \quad a'' = a'a, \quad b'' = b'b';$$

diese Gleichungen haben aber wiederum die Form (52). Sagen wir (mit *Study*) allgemein, dass bei einer bestimmten Darstellung einer r -gliedrigen continuierlichen (oder auch sog. gemischten) Gruppe durch $r+1$ homogene Parameter *bilinare Zusammensetzung der Parameter* stattfindet, wenn die Parameter der aus zwei Transformationen S_1 und S_2 der Gruppe zusammengesetzten Transformation S_1S_2 ganze homogene lineare Funktionen der Parameter von S_1 sowohl als von S_2 sind, so folgt: „Jede $(n-1)$ -gliedrige continuierliche Gruppe, die gleichzusammengesetzt ist mit einer — oder mit mehreren — der aus Systemen complexer Grössen hergeleiteten $(n-1)$ -gliedrigen Gruppen (52), ist einer Darstellung durch n homogene Parameter mit bilinearer Zusammensetzung — oder mehrerer solcher Darstellungen — fähig.“ Da unter den Gruppen (52), sobald $n > 3$ ist, nicht alle möglichen Zusammensetzungen $(n-1)$ -gliedriger Gruppen auftreten, so erfreuen sich nur verhältnismässig wenige continuierliche Gruppen dieser besonders einfachen Art der Parameterdarstellung; der Kreis dieser Gruppen erweitert sich aber bedeutend, wenn man auch überzählige Parameter zulässt³⁷⁾.

Zu den zuletzt betrachteten Kategorien von continuierlichen Gruppen gehören insbesondere auch mehrere Gruppen, die — auf andere Weise als oben geschehen — aus Systemen complexer Grössen selbst hergeleitet sind³⁶⁾. Wir heben hervor die von je $2n-m-1$ und $n-m$ wesentlichen (nicht homogenen) Parametern abhängigen Gruppen

$$(55) \quad x' = axb, \quad x' = b^{-1}xb,$$

wobei m die Zahl der linear-unabhängigen Grössen des betrachteten Systems ist, die mit allen übrigen vertauschbar sind. Die zweite dieser Gruppen ist die *adjungierte Gruppe* der $(n-1)$ -gliedrigen Gruppen $x' = ax$, $x' = xb$. Bilineare Zusammensetzung der Parameter besteht ferner für die sog. gemischten Gruppen, die aus den Gruppen (55) durch Hinzufügung der Transformation $x' = x^{-1}$ hervorgehen, sobald der Rang des betrachteten Systems complexer Grössen gleich zwei ist. Endlich gehören hierher auch die unter (53) aufgeführten Gruppen,

37) Ob jede continuierliche Gruppe auf diese Weise dargestellt werden kann, hängt von der Entscheidung der noch offenen Frage ab, ob es projektive Gruppen von jeder beliebigen Zusammensetzung giebt.

wie man erkennt, wenn man die letzte $(3n - m)$ -gliedrige Gruppe in einer der beiden Formen

$$(56) \quad x' = \alpha^{-1}(x\beta + \gamma), \quad x' = (\alpha x + \beta)\gamma^{-1}$$

schreibt, ferner die aus einem System mit commutativer Multiplikation abgeleitete $3n$ -gliedrige Gruppe

$$(57) \quad x' = \frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta}. \quad -$$

Unter die zuletzt angestellten Betrachtungen subsumieren sich eine Reihe von Anwendungen, die man von speciellen Systemen complexer Grössen gemacht hat.

Identificiert man das zu Grunde gelegte System complexer Grössen mit dem System der *Hamiltonschen Quaternionen* (34, VIa), so sind die beiden Gruppen $x' = ax$ und $x' = xb$ dreigliedrig, und können gedeutet werden als die beiden Gruppen collinearer Transformationen des Raumes, die die eine oder andere Schaar von Erzeugenden der imaginären, aber zu einem reellen Polarsystem gehörigen Fläche 2. Grades

$$x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = 0$$

in Ruhe lassen [III C 4], oder auch als die beiden Gruppen sogenannter *Schiebungen* eines Nicht-Euclidischen („elliptischen“) Raumes [III A 1]; die sechsgliedrige gemischte Gruppe $x' = axb$, $x' = ax^{-1}b$ umfasst alle eigentlichen und uneigentlichen collinearen Transformationen, die die genannte Fläche in sich selbst überführen, oder die Gesamtheit der *Bewegungen* und sog. *Umlegungen* (Transformationen mit symmetrischer Gleichheit aller Figuren) des genannten Raumes. Die dreigliedrige gemischte Gruppe $x' = a^{-1}xa$, $x' = a^{-1}x^{-1}a$ endlich besteht aus allen den collinearen Transformationen der genannten Fläche, die den Punkt allgemeiner Lage $x = c_0$ in Ruhe lassen; $x' = a^{-1}xa$ ist also bei der zweiten Auffassung die Gruppe aller *Drehungen* um einen festen Punkt des Nicht-Euclidischen Raumes³⁸⁾. Dieselben Transformationsformeln $x' = a^{-1}xa$ und $x' = a^{-1}x^{-1}a$ lassen sich aber, bei Deutung der Quotienten $\frac{x_1}{x_0}, \frac{x_2}{x_0}, \frac{x_3}{x_0}$ als rechtwinkliger Cartesischer Coordinaten, auch auffassen als analytische Darstellung der Drehungen und Umlegungen um einen festen Punkt des gewöhnlichen (Euclidischen) Raumes; sie decken sich vollständig mit den von *Euler* angegebenen Formeln zur Transformation rechtwinkliger Coordinatensysteme, während die zur Zusammensetzung der

³⁸⁾ Z. T. nach *Cayley*, J. f. Math. 50 (1855), p. 312 = Coll. Math. Papers 2, p. 214. Vgl. auch *F. Klein*, Math. Ann. 37 (1890), p. 544.

Parameter der Gruppe $x' = a^{-1}xa$ dienende Gleichung $a'' = aa'$ — das sogenannte Multiplikationstheorem der Quaternionen — mit den von *O. Rodrigues* angegebenen Formeln zur Zusammensetzung der *Euler'schen* Parameter identisch ist³⁹⁾.

In den verschiedenen Lehrbüchern der Quaternionentheorie kommen die besprochenen gruppentheoretischen Thatsachen gar nicht oder nur in unvollkommener Weise zum Ausdruck. Es muss daher hervorgehoben werden, dass die Brauchbarkeit der Quaternionen für Zwecke der Geometrie und mathematischen Physik auf eben diesen Thatsachen und auf der Bedeutung beruht, die namentlich der Gruppe der (Euklidischen) Drehungen um einen festen Punkt bei vielen Untersuchungen zukommt⁴⁰⁾. Wo die genannten Gruppen, oder mit ihnen isomorphe Gruppen nicht auftreten, da können auch die Quaternionen nur geringen Nutzen bringen; und hierin liegt der Grund dafür, warum gewisse Anwendungen des Quaternionencalculs (z. B. die auf die Geometrie der Kegelschnitte) einen etwas gekünstelten Eindruck machen und zu wenig befriedigenden Ergebnissen geführt haben. Allgemein lässt sich sagen, dass das Anwendungsgebiet der Systeme höherer complexer Grössen ziemlich beschränkt ist.

Von ferneren geometrischen Anwendungen von Systemen complexer Grössen erwähnen wir eine Darstellung der elfgliedrigen continuierlichen Gruppe der eigentlichen Ähnlichkeitstransformationen in einem vierfach ausgedehnten Raume durch die Formeln (56) mit Hülfe der Quaternionen⁴¹⁾, die Darstellung der sog. gemischten Gruppe der Bewegungen und Umlegungen in der Euklidischen Ebene wie auch im Raume durch Parameter mit bilinearer Zusammensetzung⁴²⁾, endlich eine Untersuchung von *R. Lipschitz* über die lineare Transformation einer Summe von n Quadraten in ein Vielfaches ihrer selbst⁴²⁾. Die zuletzt genannten Transformationen bilden eine bei ungeraden Werten von n continuierliche, bei geraden Werten von n aus zwei continuierlichen Schaaren bestehende (also „gemischte“) Gruppe, deren allgemeine Transformation von $\frac{n(n-1)}{2} + 1$ homogen auftretenden Parametern abhängt [III C 7]. *Lipschitz* gelangt, unter Verwendung über-

39) *Euler*, Novi Comm. Petrop. 20, p. 217. *O. Rodrigues*, Journ. de Math. 5 (1840), p. 380. *Cayley*, Phil. Mag. 26 (1845), p. 141 = Coll. Math. Pap. 1, p. 123.

40) S. die genauere Formulierung bei *Study*, Math. Papers from the Chicago Congress, New York 1896, p. 376. Vgl. auch *H. Burkhardt*, „Über Vectoranalysis“, Deutsche Math.-Vrg. 5 (1896), p. 43, sowie *Klein* und *Sommerfeld*, Theorie des Kreisels, Leipzig 1897, I § 7.

41) Chicago Papers a. a. O. *Study*, Math. Ann. 39 (1891), p. 514.

42) Untersuchungen über die Summen von Quadraten, Bonn 1886. Vgl. Nr. 14,

zähliger Parameter, zu einer Darstellung sämtlicher Transformationen der genannten Gruppe durch Parameter mit bilinearer Zusammensetzung, indem er von gewissen Systemen complexer Grössen ausgeht, die, als Verallgemeinerungen der Quaternionen, bereits von *Clifford* aufgestellt worden waren⁴³⁾. Das erste dieser Systeme wird von 2^n Einheiten $\iota_\alpha, \iota_{\alpha\beta}, \iota_{\alpha\beta\gamma} \dots$ gebildet; es ist, wenn die Haupteinheit mit ι_0 bezeichnet wird, definiert durch die Multiplikationsregeln

$$\begin{aligned} \iota_1^2 = \iota_2^2 = \dots = \iota_n^2 = -\iota_0, \quad \iota_\alpha \iota_\beta = -\iota_\beta \iota_\alpha = \iota_{\alpha\beta}, \\ (58) \quad \iota_{\alpha\beta} \iota_\gamma = \iota_{\alpha\beta\gamma} = \iota_{\alpha\beta\gamma}, \quad \dots, \quad \iota_1 \iota_2 \iota_3 \dots \iota_n = \iota_{123 \dots n} \\ (\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq \dots); \end{aligned}$$

das zweite, in der genannten Untersuchung verwendete (von dem ersten übrigens nur durch die Zahl der Einheiten und die Wahl der Basis unterschiedene) System mit einer 2^{n-1} Einheiten umfassenden Basis besteht aus ι_0 und den eine gerade Anzahl von Indices ($\alpha\beta, \alpha\beta\gamma\delta, \dots$) tragenden Einheiten des ersten Systems.

Die zur linearen Transformation einer Summe von n Quadraten in ein Vielfaches ihrer selbst dienenden Formeln sind, abgesehen von einer wie es scheint unvermeidlichen Unsymmetrie, vollkommen analog der von uns schon besprochenen Lösung des Problems in den Fällen $n=3$ und $n=4$; sie zeigen überdies, wie man alle solchen Transformationen mit rationalen Zahlencoefficienten finden kann.

13. Klassifikation der Systeme complexer Grössen. Den Zusammenhang der Systeme complexer Grössen mit der Theorie der Transformationsgruppen haben *G. Scheffers*⁴⁴⁾ und *Th. Molien*⁴⁵⁾ zur Klassifikation der genannten Systeme benutzt. *Scheffers* teilt, an Sätze von *Lie* und *Engel* anknüpfend, die Systeme complexer Grössen in „Nicht-Quaternionensysteme“ und „Quaternionensysteme“. Bei den Systemen der ersten Klasse lassen sich die n Einheiten einer geeigneten Basis auf zwei Gruppen $e_1 \dots e_r, \eta_1 \dots \eta_s$ ($r+s=n$) verteilen, derart, dass $e_i^2 = e_i, e_i e_x = 0$ ist, dass das Produkt von irgend zweien

43) Am. J. of Math. 1 (1878), p. 350 = Coll. Papers (London 1882) Nr. 30, wo bereits die Entstehung der obigen Systeme durch den in Nr. 8 besprochenen Multiplikationsprocess angegeben wird. S. auch Coll. Papers Nr. 43. Neuerdings ist auch *R. Beez* auf diese Systeme gekommen in einer leider verschiedenes Irrtümliche enthaltenden Arbeit: Z. f. Math. u. Phys., Jahrg. 41 (1896), p. 35, 65.

44) Math. Ann. 39 (1891), p. 293; 41 (1893), p. 601.

45) Über Systeme höherer complexer Zahlen. Diss. Dorpat = Math. Ann. 41 (1893), p. 83; ebenda 42 (1893), p. 308. Vgl. ferner Dorp. Ber. 1897, p. 259. Der letzte Aufsatz enthält eine Anwendung der Systeme complexer Grössen auf die Theorie gewisser Gruppen von *discreten* linearen Transformationen.

der Einheiten η nur von den Einheiten η mit höherem Index abhängt, und dass alle Produkte der Einheiten e_i mit einer Einheit η_j Null sind, mit Ausnahme von zweien, für die man $e_x \eta_j = \eta_j e_x = \eta_j$ hat. Bei allen diesen Systemen, und bei ihnen allein, sind die Wurzeln der Ranggleichung lineare Funktionen der Coordinaten einer Grösse des Systems⁴⁶⁾. Die Quaternionsysteme lassen sich, wie indessen erst durch *Molien* klar gestellt worden ist, so schreiben, dass das System der *Hamilton'schen* Quaternionen (34, VIa oder VIb) unter den Einheiten der Basis vorkommt. Zu ihnen gehören fast alle die Systeme, die in den unter Nr. 12 besprochenen Anwendungen hervorgetreten sind. Alle Quaternionsysteme, die die Quaternionen so enthalten, dass die Haupteinheit der Quaternionen zugleich Haupteinheit des Gesamtsystems ist, gehen nach *Scheffers* aus den *Hamilton'schen* Quaternionen durch „Multiplikation“ (s. oben unter Nr. 8) mit irgend einem anderen System complexer Grössen hervor. Anwendungen dieser Theorie bilden die Bestimmung aller Typen von Systemen complexer Grössen mit n Einheiten, deren Rang gleich zwei oder gleich $n - 1$ ist, und im wesentlichen auch derer, deren Rang gleich $n - 2$ ist, und insbesondere die Bestimmung aller *Typen von Systemen mit fünf Einheiten*⁴⁷⁾, ferner die Bestimmung aller Quaternionsysteme bis zu acht Einheiten. Es giebt bei vier und sieben Einheiten je ein irreducibles System dieser Art, und bei acht Einheiten drei, darunter ein schon von *Clifford* angegebenes System⁴⁸⁾, eine von dessen verschiedenen Arten von *Biquaternionen*, dasselbe System, das zur Parameterdarstellung der Bewegungen im Euklidischen Raume dient⁴¹⁾.

Molien führt eine Reihe neuer Begriffe ein, von denen wir nur einige der wichtigsten anführen können, darunter den des *begleitenden Systems* eines gegebenen. Ein solches wird von den Einheiten $e_1 \dots e_r$ einer geeignet gewählten Basis ($e_1 \dots e_r \dots e_n$) gebildet, wenn die Produkte $e_i e_x$ für $i, x \leq r$ sich durch $e_1 \dots e_r$ selbst ausdrücken lassen, alle anderen Produkte zweier Einheiten aber durch $e_{r+1} \dots e_n$. Hat ein System complexer Grössen kein kleineres begleitendes System, so heisst es „ursprünglich“. Alle ursprünglichen Systeme werden durch die unter

46) Der Satz umfasst den unter Nr. 11 angeführten Satz von *Frobenius* (s. Anm. 31). *Scheffers* benutzt jedoch nicht ausschliesslich algebraische Hilfsmittel.

47) Die vom Range zwei und vier sind auch von *H. Rohr* angegeben worden: Über die aus 5 Haupteinheiten gebildeten complexen Zahlensysteme. Diss. Marburg 1890.

48) Lond. Math. Proc. 4 (1873), p. 381 = Coll. Papers, London 1882 Nr. 20; ebenda Nr. 42.

Nr. 10 betrachteten Systeme mit n^2 Einheiten erschöpft. Darin liegt zugleich der gruppentheoretische Satz, dass diese Systeme die einzigen sind, deren entsprechende (im vorliegenden Falle $(n^2 - 1)$ -gliedrige) Gruppen $x' = ax$, $x' = xb$ einfach sind [II A 6]. Allgemein lässt sich die Basis so wählen, dass als begleitende Systeme μ von einander unabhängige ursprüngliche Systeme auftreten, die zusammengenommen ein μ irreducibele Bestandteile enthaltendes (also, wenn $\mu > 1$, reducibeles) begleitendes System bilden.

Verwandten und zum Teil desselben Inhalts ist eine Untersuchung von E. Cartan, über die zur Zeit nur vorläufige Mitteilungen (ohne Beweise) vorliegen⁴⁹). Wir heben daraus hervor die Bestimmung aller Gestalten ursprünglicher Systeme. Nur die mit $4m^2$ Einheiten haben — so lässt sich Cartan's Behauptung ausdrücken — mehrere reelle Gestalten, und zwar zwei verschiedene. Die eine ist die uns schon bekannte (40), die andere wird erhalten, wenn man das System (40) mit m^2 Einheiten bildet, und es mit den Hamilton'schen Quaternionen (VIa) „multipliziert“ (s. Nr. 8). Zu den „ursprünglichen“ Systemen Molien's kommen bei Beschränkung auf reelle Systeme noch andere, die man als reell-ursprüngliche Systeme bezeichnen könnte, Systeme ohne reelle begleitende Systeme. Diese werden nach Cartan von $2n^2$ Einheiten gebildet; sie werden erhalten, wenn man die Systeme (40) mit dem reellen System der gewöhnlichen complexen Grössen multipliziert. Die Gesamtheit aller reell-ursprünglichen Systeme entsteht also, nach Cartan, wenn man die Reihe der Systeme (40) erstens mit dem aus einer Einheit bestehenden System, zweitens mit dem System der gemeinen complexen Grössen, drittens mit den Quaternionen „multipliziert“.

14. Ansätze zu einer Functionentheorie und Zahlentheorie der Systeme höherer complexer Grössen. Nur ein sehr bescheidener Anfang liegt vor von Untersuchungen, die eine Ausdehnung von Sätzen der gewöhnlichen Functionentheorie [II B 1; vgl. II A 7b] auf beliebige Systeme complexer Grössen zum Ziel haben. Ed. Weyr hat die Bedingung dafür angegeben, dass eine Potenzreihe $\sum a_r x^r$ convergiert, in der die Coefficienten a_r gewöhnliche complexe Grössen sind, x aber eine Grösse eines beliebigen Systems bedeutet. Er findet, dass die Wurzeln r_x der charakteristischen Gleichung (46) dem Convergenzgebiete der gewöhnlichen Potenzreihe $\sum a_r x^r$ angehören müssen⁵⁰). G. Scheffers hat einige hierher gehörige Betrachtungen über Systeme mit commuta-

49) Par. C. R. vom 31. Mai und 8. Juni 1897.

50) Bull. des Sciences Math. 2^{me} sér. 11 (1887), p. 205.

tiver Multiplikation angestellt⁵¹⁾. Er gelangt zu einer Definition der „analytischen“ Funktionen im Gebiete eines solchen Systems und zur Darstellung dieser Funktionen durch Potenzreihen $f(x) = \sum c_v x^v$; die Operationen des Differenzierens und Integrierens gestalten sich im wesentlichen wie in der gewöhnlichen Funktionentheorie.

Die Gleichung $x' = f(x)$ definiert eine continuierliche *unendliche Gruppe*, und zwar erhält man auf diese Weise alle solche Gruppen, bei denen die Fortschreitungsrichtungen um einen Punkt „allgemeiner Lage“ herum durch eine einfach-transitive (also $(n-1)$ -gliedrige) Gruppe von vertauschbaren projektiven Transformationen transformiert werden. Die grössten endlichen continuierlichen Untergruppen einer solchen Gruppe sind die $3n$ -gliedrigen Gruppen (57) und die mit ihnen gleichberechtigten.

Auch zu einer *Zahlentheorie* der Systeme komplexer Grössen ist erst ein Anfang gemacht. Nur die gerade in dieser Hinsicht einen Ausnahmefall darstellenden Hamilton'schen Quaternionen sind bis jetzt untersucht worden, von *Lipschitz*⁴²⁾, und — eingehender und auf anderer Grundlage — von *Hurwitz*⁵²⁾ (I C).

Nachtrag. Aus Aufzeichnungen, die sich im Nachlass von *Gauss* vorgefunden haben, geht hervor, dass er im Jahre 1819 oder 1820 schon im Besitz der *Hamilton'schen* Quaternionen und ihrer Anwendung zur Darstellung und Zusammensetzung der Drehungen (und Ähnlichkeitstransformationen) um einen festen Punkt gewesen ist, und dass er auch das Multiplikationstheorem der Quaternionen schon in Gestalt eines Produkts

$$(abcd)(\alpha\beta\gamma\delta) = (ABCD)$$

geschrieben hat. S. Gött. Nachr. 1898, p. 8, und ebenda *F. Klein*: Geschäftliche Mittheilungen p. 3.

51) Leipz. Ber. 1893, p. 828; 1894, p. 120.

52) Gött. Nachr. 1896, p. 314.

I A 5. MENGENLEHRE.

VON

A. SCHÖNFLIES

IN GÖTTINGEN.

Inhaltsübersicht.

I. Historisches.

1. Häufungsstellen von Punktmengen und deren Ableitungen.
2. Der Abzählbarkeitsbegriff und das Continuum.
3. *Cantor's* erste Einführung der transfiniten Zahlen.

II. Die transfiniten Mengen.

4. Die Mächtigkeit oder Kardinalzahl.
5. Die Ordnungstypen.
6. Die wohlgeordneten Mengen und ihre Abschnitte.
7. Die Ordnungszahlen und die Zahlklasse $Z(\aleph_0)$.
8. Mengen höherer Mächtigkeit.
9. Die allgemeinen Rechnungsgesetze der Ordnungszahlen.
10. Die Normalform der Ordnungszahlen und die ϵ -Zahlen.

III. Die Punktmengen.

11. Allgemeine Definitionen und Formeln für Punktmengen.
12. Allgemeine Lehrsätze über Punktmengen.
13. Die abgeschlossenen und perfekten Mengen.
14. Zerlegung einer Menge in separierte und homogene Bestandteile.
15. Der Inhalt von Punktmengen.
16. Das Continuum.

IV. Infinitärkalkül und allgemeinste Grössensysteme.

17. Die Unendlich (\aleph) der Funktionen.
 18. Das Axiom des Archimedes und die Stetigkeit.
 19. Die allgemeinsten Grössenklassen.
-

Monographiien.

- B. Bolzano*, Paradoxieen des Unendlichen, 1850; 2. Auflage, Berlin 1889.
P. du Bois-Reymond, Die allgemeine Funktionenlehre, Tübingen 1882.
G. Cantor, Grundlagen einer allgemeinen Mannigfaltigkeitslehre, Leipzig 1883, zugleich in Math. Ann. 21, p. 545 erschienen.
R. Bettazzi, Teoria delle grandezze, Pisa 1891. Zugleich in Bd. 19 der Annali delle università toscane, 1893, erschienen.

G. Veronese, Fondamenti di geometria, Padova 1891, deutsch übersetzt von *A. Schepp* unter dem Titel: Grundlagen der Geometrie, Leipzig 1894.
E. Borel, Leçons sur la théorie des fonctions, Paris 1898.

Eine Zusammenstellung der Hauptresultate der Mengenlehre gab *G. Vivanti* (Bibliotheca mathem., Neue Folge 6. p. 9 [1892]). Ein grosser Teil der *Cantor'schen* Arbeiten ist in *Acta mat.* 2 abgedruckt.

Bezeichnungen.

\mathbb{C}_n bedeutet das n -dimensionale *Continuum*. Die erste Zahlklasse (vgl. Nr. 7) wird durch $Z(I)$, die zweite Zahlklasse (vgl. Nr. 7) durch $Z(II)$ oder $Z(\aleph_0)$ bezeichnet; \aleph_0 stellt die Mächtigkeit der Reihe der ganzen Zahlen dar, d. h. der Klasse $Z(I)$. — \aleph bedeutet das „Unendlich“.

1. Häufungsstellen von Punktmengen und deren Ableitungen.

Während *K. Fr. Gauss* gegen den Gebrauch „einer unendlichen Grösse als einer vollendeten“ ausdrücklich protestiert hat¹⁾, ist es *G. Cantor* gelungen, die Einführung solcher Grössen in die Arithmetik zu begründen und damit die Fortsetzung der Reihe der ganzen positiven Zahlen über das Unendliche hinaus zu definieren²⁾. Die Notwendigkeit hierzu ergab sich einerseits bei den Untersuchungen über den Inhalt und die Häufungsstellen von Punktmengen (Nr. 1), andererseits bei der Vergleichung der Mengen arithmetisch definierter Zahlgrössen (Nr. 2). (Vgl. besonders II A 1 und II B 1.)

Für eine aus unbegrenzt vielen Punkten bestehende Menge P giebt es nach einem Satz von *Bolzano-K. Weierstrass*³⁾ mindestens eine Häufungsstelle (Grenzpunkt, Verdichtungspunkt). Alle Grenzpunkte einer Menge P bilden eine Punktmenge P' , die *Cantor* die *Ableitung* von P nennt⁴⁾. Enthält die Menge P' unendlich viele Punkte⁵⁾, so besitzt sie eine Ableitung P'' , die auch zweite Ableitung von P heisst u. s. w. Jeder Punkt einer Ableitung $P^{(v)}$ ist in allen vorhergehenden Ableitungen enthalten. Ein Punkt p , der noch in $P^{(v)}$, aber nicht mehr in $P^{(v+1)}$ vorhanden ist, heisst Häufungsstelle v ter Ordnung. *Cantor* nennt die den Mengen $P, Q, R \dots$ gemeinsamen Punkte auch

1) Briefwechsel zwischen *K. Fr. Gauss* und *H. Chr. Schumacher* 2, p. 269.

2) *Cantor* bemerkt in *Math. Ann.* 17, p. 358, dass er schon 1870 zu dieser Überzeugung gelangt sei.

3) Über den Ursprung des bezüglichen Schlussverfahrens vgl. *Cantor* in *Math. Ann.* 23, p. 455.

4) *Math. Ann.* 5 (1872), p. 129.

5) Eine Menge dieser Art erhält man z. B., indem man für $n = 1, 2, 3 \dots$ in jedes Intervall $\frac{1}{n} \dots \frac{1}{n+1}$ eine Punktmenge setzt, für die $\frac{1}{n+1}$ eine Häufungsstelle ist. Vgl. auch *P. du Bois-Reymond* in *J. f. Math.* 79, p. 36.

ihren grössten gemeinsamen Divisor $\mathfrak{D}(P, Q, R \dots)^6$, und hat daher $P^{(\nu)} = \mathfrak{D}(P'P'' \dots P^{(\nu)})$.

Es kann der Fall eintreten, dass der Ableitungsprocess für kein endliches ν ein Ende nimmt; alsdann existiert eine Menge $R = \mathfrak{D}(P', P'' \dots)$, für die Cantor das Zeichen $P^{(\infty)}$ (später $P^{(\omega)}$) eingeführt hat⁷). Die Existenz von Punktmengen, für die $P^{(\infty)}$ selbst aus unendlich vielen Punkten besteht, führte dazu, den Ableitungen dieser Menge in konsequenter Fortbildung der Bezeichnungsweise die Symbole $P^{(\infty+1)}$, $P^{(\infty+2)}$... $P^{(2\infty)}$... $P^{(\infty^2)}$... zu geben.

2. Der Abzählbarkeitsbegriff und das Continuum. Bereits im Jahre 1873⁸) war Cantor zu dem wichtigen Fundamentalbegriff der *Abzählbarkeit* gelangt. Er bewies⁸), dass man die Gesamtheit der algebraischen Zahlen eineindeutig den positiven ganzen Zahlen zuordnen kann, d. h. dass man sie in eine Reihe bringen kann, die ein erstes Glied besitzt und in der jede bestimmte algebraische Zahl eine angebbare Stelle einnimmt. Cantor nennt sie deshalb *abzählbar*⁹). Alle abzählbaren Mengen heissen von gleicher *Mächtigkeit*. Es gilt der Satz, dass jede endliche oder abzählbar unendliche Menge solcher Mengen selbst wieder abzählbar ist¹⁰). Dagegen ist die Gesamtheit aller Zahlen (das arithmetische Zahlencontinuum \mathfrak{C}) resp. die Gesamtheit aller Zahlen eines bestimmten Intervalls *nicht* abzählbar, und besitzt insofern eine höhere Mächtigkeit¹¹). Der Beweis beruht auf folgendem, für die Abzählbarkeitsfragen principiellen Schlussverfahren: dass eine Menge, welche ein durch einen unendlichen Process (z. B. Fundamentalreihe) definierbares Element in sich enthält, nicht abzählbar

6) Math. Ann. 17, p. 355.

7) Eine Menge, deren $P^{(\infty)}$ den Nullpunkt liefert, konstruiert Cantor so, dass er in jedes der in Anm. 5 genannten Intervalle eine Menge setzt, für die $\frac{1}{n+1}$ eine Häufungsstelle n ter Ordnung ist, Math. Ann. 17 (1880), p. 358.

Eine Menge dieser Art giebt auch du Bois-Reymond, Fktl. p. 187. Vgl. auch G. Mittag-Leffler in Acta Math. 4, p. 58.

8) J. f. Math. 77, p. 258. Die Art, wie man die rationalen Zahlen am einfachsten in eine solche Reihe bringt, findet sich in J. f. Math. 84 (1877), p. 250.

9) Vgl. jedoch die spätere Erweiterung dieses Begriffs in Nr. 8.

10) Zuerst von Cantor ausgesprochen in J. f. Math. 84 (1877), p. 24. Der Satz folgt daraus, dass man eine Doppelreihe als einfache Reihe anordnen kann (ein geom. Beweis bei Fr. Meyer, Böklen's math. naturw. Abhdlgn. 1 [1886], p. 80) und umgekehrt, ein Gedanke, der vielen Sätzen der Mengenlehre zu Grunde liegt.

11) J. f. Math. 77, p. 259. Bettazzi hat gezeigt, dass man die Zahlen-gesamtheit nicht ausdrücken kann, wenn man eine abzählbare Menge von Zeichen verwendet, aber für jede Zahl nur eine endliche Anzahl dieser Zeichen benutzt. Per. di mat. 6 (1891), p. 14.

sein kann, wenn dies Element in der nach Annahme abzählbaren Menge nicht mit endlicher Stellenzahl erscheint¹²⁾.

Ebenfalls 1873 fand *Cantor* den Satz, dass das n -dimensionale \mathfrak{C}_n die gleiche Mächtigkeit besitzt, wie das lineare, und zwar in dem Sinne, dass jeder Zahl von \mathfrak{C}_1 eine bestimmte Zahlgruppe von \mathfrak{C}_n zugeordnet werden kann und umgekehrt¹³⁾. Das Gleiche gilt für das \mathfrak{C} von unendlich vielen Dimensionen. Hiernach glaubte *Cantor* die Vermutung aussprechen zu sollen, dass es für alle unendlichen Punktmengen eines Raumes R_n nur zwei verschiedene Mächtigkeitsklassen giebt, nämlich entweder die Mächtigkeit der abzählbaren Zahlenreihe oder die Mächtigkeit des Continuum¹⁴⁾. Diese Vermutung harrt jedoch noch des Beweises. Der von *P. Tannery*¹⁵⁾ gegebene Beweisversuch ist nicht bindend.

Die eindeutige Abbildung eines \mathfrak{C}_n und \mathfrak{C}_m ist niemals stetig¹⁶⁾.

3. Cantor's erste Einführung der transfiniten Zahlen. Den letzten wichtigen Schritt in der Grundlegung der Mengenlehre that *Cantor* im Jahre 1882¹⁷⁾. Er wurzelt in der Erkenntnis, dass man die für die Ableitungen der Punktmengen eingeführten Symbole („Unendlichkeitssymbole“ in erster Bezeichnung) arithmetisch definieren und den Rechnungsgesetzen unterwerfen kann. Es beruht darauf, dass man diese Symbole als verschiedene Anordnungen der abzählbaren Zahlenmenge auffassen kann. Ist ω das Symbol für die Gesamtheit der ganzen positiven Zahlen in ihrer natürlichen Folge, resp. für die Elemente $f_1 f_2 f_3 \dots$, so lassen sich die Mengen

12) *Cantor* in J. f. Math. 77 (1873), p. 260. Für dieses Schlussverfahren vgl. auch den Beweis von *du Bois*, dass man jede Ordnung des Unendlichwerdens einer Funktion übertreffen kann; J. f. Math. 76 (1873), p. 89.

13) J. f. Math. 84, p. 246. Der Beweis gründet sich auf die bezügliche Zuordnung der Irrationalzahlen des \mathfrak{C}_1 und \mathfrak{C}_n und benutzt dazu deren Darstellung durch einen unendlichen Kettenbruch, dessen unendlich viele Teilnenner sich in n ebenfalls unendliche Gruppen spalten lassen und so n neue Irrationalzahlen bestimmen und umgekehrt. Die analoge Spaltung ist auf Dezimalbrüche anwendbar und bildet den Beweisgrund analoger Sätze. Einen auf der Theorie der Punktmengen beruhenden Beweis gab später *J. Bendixson* in Stockh. Hndl. Bih. 9, Nr. 6 (1885).

14) J. f. Math. 84, p. 258.

15) Bull. de la Soc. de Fr. 12 (1884), p. 90.

16) Einen Beweis dieses Satzes gab 1878 *E. Netto* (J. f. Math. 86, p. 263), sodann *Cantor* in Gött. Nachr. 1879, p. 127. Aus dem Satz folgt, dass die von *B. Riemann* und *H. Helmholtz* gegebene arithmetische Definition des R_n durch n unabhängige Coordinaten dahin zu ergänzen ist, dass die Zuordnung umkehrbar eindeutig und stetig ist.

17) Math. Ann. 21, p. 535, sowie Grundlagen etc.

$$f_1 f_2 f_3 \dots g_1, \quad f_1 f_2 f_3 \dots g_1 g_2, \quad f_1 f_2 f_3 \dots g_1 g_2 g_3 \dots$$

ihrer *Anordnung* nach durch die Symbole $\omega + 1$, $\omega + 2$, $\omega + \omega$ bezeichnen (Nr. 6 und 7). Dies sind *Cantor's transfinite Zahlen*. Ihre allgemeine Konstruktion gründet er auf zwei „Erzeugungsprincipien“. Das erste besteht in der Hinzufügung einer Einheit zu einer schon vorhandenen Zahl, das zweite verlangt, dass zu jeder unbegrenzten Zahlenreihe stets wachsender Zahlen eine neue *nächst* grössere Zahl existiert; es lässt z. B. auf $\omega + 1$, $\omega + 2 \dots \omega + n \dots$ die Zahl $\omega + \omega = \omega \cdot 2$ ¹⁸⁾ folgen, auf ω , $\omega \cdot 2$, $\omega \cdot 3 \dots \omega \cdot n \dots$ die Zahl $\omega \cdot \omega = \omega^2$, auf ω , ω^2 , $\omega^3 \dots \omega^n \dots$ die Zahl ω^ω u. s. w., u. s. w.

4. Die Mächtigkeit oder Kardinalzahl. Die genaue logische und arithmetische Analyse der vorstehenden Ideen führte *Cantor* schliesslich zu folgenden 1895 veröffentlichten Formulierungen¹⁹⁾. Die Grundbegriffe sind *Menge*, *Mächtigkeit*, *Ordnungstypus*, *wohlgeordnete Menge*. Menge oder Mannigfaltigkeit heisst jede Zusammenfassung von bestimmten wohldefinierten und wohlunterschiedenen Objekten²⁰⁾ m zu einem Ganzen; $M = \{m\}$. Mengen heissen *äquivalent* oder von gleicher Mächtigkeit²¹⁾, wenn sie einander eineindeutig zugeordnet werden können ($M \sim N$). Die Mächtigkeit M einer Menge heisst auch ihre *Kardinalzahl* α ; für endliche Mengen fällt sie mit dem Anzahlbegriff zusammen.

Bei dieser Begriffsbestimmung besteht der wesentliche Unterschied zwischen einer endlichen und unendlichen (transfiniten) Menge²²⁾ darin, dass eine unendliche Menge einer ihrer Teilmengen äquivalent sein kann, während dies für endliche Mengen nicht der Fall ist²³⁾.

18) Ursprünglich von *Cantor* durch 2ω bezeichnet.

19) *Math. Ann.* 46, p. 481; teilweise schon vorher in der *Z. f. Philos.* 91, p. 95 und 92, p. 240 dargestellt (1887).

20) Die genaue Begriffsbestimmung dieser Worte findet sich *Math. Ann.* 20, p. 114. Sie steht im Gegensatz zu *L. Kronecker's* Forderung in den Grundlagen einer arithm. Theorie p. 11 (*M. Pasch* in *Math. Ann.* 40 (1892), p. 150). Vgl. auch *Borel* a. a. O. p. 3. Aber erst die Überwindung dieser Forderungen hat die Mengenlehre möglich gemacht. Vgl. auch *du Bois*, *Funktionenlehre*, p. 184 u. 204 ff.

21) Diesen Ausdruck hat *Cantor* von *J. Steiner* übernommen; *Math. Ann.* 20, p. 116.

22) *Bolzano* (*Paradoxieen des Unendl.* § 13) und *R. Dedekind* (*Was sind und was sollen die Zahlen*, Braunschw. 1888, § 1) haben sogar einen Beweis gegeben, dass es Mengen giebt, die nicht endlich sind.

23) Hierfür vgl. *Dedekind* a. a. O. p. 17, sowie *Cantor*, *J. f. Math.* 84, p. 242 und *Bolzano* a. a. O. § 20 u. 21. Im Anschluss an obige Definition der unendlichen Zahl wird sogar in neuerer Zeit die endliche Zahl als eine solche defi-

Dies hindert jedoch nicht, dass sich, ausser dem Gleichheitsbegriff, auch die Beziehung des „grösser und kleiner“ auf beliebige transfinite Mengen, resp. ihre Kardinalzahlen $\alpha = \overline{M}$, $\beta = \overline{N}$ übertragen lässt. Die Definition lautet so, dass $\alpha > \beta$ heisst, falls keine Teilmenge von N mit M äquivalent ist, aber eine Teilmenge M_1 von M existiert, die mit N äquivalent ist. Diese Definition genügt der logischen Forderung, dass von den drei Möglichkeiten $\alpha = \beta$, $\alpha > \beta$, $\alpha < \beta$ jede die beiden andern ausschliesst. Der Beweis jedoch, dass von diesen drei Möglichkeiten stets eine erfüllt ist, dass also die transfiniten Kardinalzahlen im Sinne *H. Grassmann's* den allgemeinsten *Grössencharakter* besitzen, hat sich bisher nicht vollständig führen lassen. Dagegen ist es in letzter Zeit gelungen, zu erweisen, dass zwei transfinite Kardinalzahlen gleich sind, wenn jede der beiden Mengen einem Teil der andern äquivalent ist²⁴), was praktisch ausreicht.

Da der Mächtigkeitsbegriff von der Ordnung und Beschaffenheit der Elemente abstrahiert, so lassen sich die Definitionen und Gesetze der Addition und Multiplikation ohne Ausnahme auf die Kardinalzahlen übertragen. Die Summe der Kardinalzahlen $\alpha = \overline{M}$, $\beta = \overline{N}$ ist als die Mächtigkeit der Vereinigungsmenge $\{M, N\}$, das Produkt als die Mächtigkeit aller Elementenpaare (m, n) zu definieren, woraus sich die Geltung des commutativen, associativen und distributiven Gesetzes ergibt. Um zur Potenz zu gelangen, wird der Begriff der *Belegung* von N mit M benutzt²⁵). Die Belegung ist ein Gesetz, das jedem Element n ein Element $m = f(n)$ zuordnet; Belegungen sind danach immer und nur dann gleich, wenn sie mit jedem n je das nämliche m verbinden. Die Gesamtheit aller Belegungen von N mit M (die Belegungsmenge) liefert die Potenz α^β und folgt den Potenzgesetzen.

Die kleinste transfinite Kardinalzahl \aleph_0 ist die Mächtigkeit der Reihe der positiven ganzen Zahlen; jede transfinite Menge besitzt nämlich Teilmengen von der Mächtigkeit \aleph_0 . Da jede endliche sowie

niert, die nicht unendlich ist. Überhaupt haben die obigen Begriffe „Menge“ und „Zuordnung“ auch für die Erörterung der Grundlagen der elementaren Zahlenlehre eine grosse Bedeutung erlangt. Vgl. z. B. *Bettazzi*, *Fondamenti per una teoria generale dei gruppi*, Rom 1896, sowie Artikel desselben Verfassers und von *C. Burali-Forti* in den *Atti di Torino* 31 u. 32 (1896).

24) *Borel* a. a. O. p. 103. Der Beweis stammt von *F. Bernstein*. Zuerst bewiesen wurde der Satz 1896 von *E. Schröder*. Vgl. dazu *Jahresb. d. deutsch. Math.-V.* 5, p. 81, sowie *Nova Acta Leop.* 71 (1898), p. 303.

25) Im Keim ist diese Idee schon bei *P. Tannery* vorhanden; vgl. Anm. 15. Eine Funktion einer reellen Variablen stellt danach eine Belegung des \mathfrak{C} mit sich selbst dar, ihre Gesamtheit die Belegungsmenge von \mathfrak{C} mit sich selbst.

auch jede abzählbare Menge abzählbarer Mengen selbst abzählbar ist, so bestehen für jedes endliche ν die Gleichungen

$$\nu \aleph_0 = \aleph_0, \quad \aleph_0 \cdot \aleph_0 = \aleph_0, \quad \aleph_0^\nu = \aleph_0.$$

5. Die Ordnungstypen. Besteht für die Elemente der Menge M eine *Rangordnung*, die für je zwei Elemente m_1 und m_2 bestimmt, welches dem andern vorangeht ($m_1 \prec m_2$), so heisst die Menge geordnet resp. *einfach* geordnet. Wenn $M \sim N$ ist und je zwei Elemente m_1 und m_2 die gleiche Rangordnung besitzen, wie die entsprechenden Elemente n_1 und n_2 , so heissen die Mengen *ähnlich* geordnet ($M \simeq N$) oder von *gleichem Ordnungstypus*. Der Ordnungstypus von M ($\alpha = \bar{M}$) wird also durch die Art der Rangordnung bestimmt²⁶). Während eine endliche Menge nur einen Ordnungstypus besitzt ($M = f_1 f_2 \dots f_m$), ist deren Zahl bei einer transfiniten Menge selbst transfinit und bildet die zur Menge gehörige *Typenklasse*.

Der einfachste Typus ω ist derjenige der Reihe der ganzen Zahlen (Nr. 3). Teilmengen vom Typus ω resp. vom inversen Typus $^*\omega$ sind in jeder transfiniten geordneten Menge enthalten und heissen *Fundamentalreihen*. Mit ihnen lassen sich analog zur Theorie der Irrationalzahl Grenzelemente definieren; man hat nur die Grössenbeziehung durch eine Beziehung dem Range nach zu ersetzen (Nr. 7). Die Beziehung zwischen Fundamentalreihe und Grenzelement bleibt für alle ähnlichen Mengen erhalten.

Der Begriff des Ordnungstypus lässt sich auf *mehrfach* geordnete Mengen übertragen, d. h. auf solche, bei denen für m_1 und m_2 das Rangverhältnis in mehr als einer Hinsicht in Frage kommt. Ist die Zahl der Elemente endlich, so ist auch die Zahl ihrer Ordnungstypen endlich. Die Anzahl aller Ordnungstypen von m Elementen, die n -fach geordnet sind, ist von *Cantor* bestimmt worden²⁷). Analoge Sätze und Reduktionsformeln gaben auch *H. Schwarz* und *Vivanti*²⁸).

Auf die Ordnungstypen lassen sich die Definitionen der Summe und des Produkts übertragen. Die Summe $\alpha + \beta$ von $\alpha = \bar{M}$ (Augendus) und $\beta = \bar{N}$ (Addendus) ist der Ordnungstypus der Vereinigungsmenge $\{M, N\}$, in der die Rangbeziehungen für M und N bestehen

26) Die rationalen Zahlen zwischen 0 und 1 kann man z. B. auf folgende Arten ordnen: 1) $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{5}, \dots$, 2) $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \dots, \frac{2}{3}, \frac{2}{5}, \dots, \frac{3}{4}, \frac{3}{5}, \dots$ 3) der Grösse nach. Bei 1) hat *jede* Zahl (ausser $\frac{1}{2}$) eine nächstfolgende und nächstvorhergehende, bei 2) nur eine nächstfolgende, bei 3) weder das eine noch das andere. Für 1) ist ω der Ordnungstypus, für 2) $\omega + \omega + \omega + \dots = \omega \cdot \omega$ (vgl. Anm. 30).

27) Z. f. Philos. 92 (1887), p. 240.

28) Dissertation, Halle 1888, sowie Ann. di mat. (2) 17 (1889), p. 1.

bleiben und jedes Element von M niederen Rang hat, als jedes Element von N . Zum Produkt $\alpha \cdot \beta$ gelangt man so, dass in die Menge N an Stelle jedes Elementes n , eine der Menge M ähnliche Menge M_n gesetzt wird und die Rangbeziehungen demgemäss definiert werden²⁹⁾; β heisst Multiplikator, α Multiplikandus; $\alpha \cdot \beta$ bedeutet also so viel als α angewandt auf oder eingesetzt in β .³⁰⁾

Da sich der Begriff des Ordnungstypus auf die Anordnung der Elemente stützt, so bleiben von den Rechnungsgesetzen nur die associativen, nicht aber die commutativen in Kraft. Im Gegensatz zu den endlichen Zahlen stellen aber Summe und Produkt unendlich vieler Ordnungstypen immer einen Ordnungstypus dar (Nr. 7).

6. Die wohlgeordneten Mengen und ihre Abschnitte. In dem Ordnungstypus und seinen Gesetzen besteht die logisch geklärte Grundlage, die Cantor zur Konstruktion der transfiniten Zahlen benutzt hat³¹⁾. Diese Zahlen sind nichts andres als die Ordnungstypen wohlgeordneter Mengen. Eine geordnete Menge heisst *wohlgeordnet*, wenn sie selbst, sowie jede ihrer Teilmengen, ein dem Range nach niedrigstes Element besitzt. Die wichtigste Folge dieser Definition ist, dass in einer wohlgeordneten Menge F auf jedes bestimmte Element, falls es nicht das letzte ist, ein Element folgt, und dass es in ihr keine Reihe von Elementen $f > f' > f'' > \dots$ giebt, die nicht abbricht. In dieser Thatsache liegt der Hauptbeweisgrund der folgenden Sätze.

Die wohlgeordneten Mengen F besitzen Grössencharakter (4). Um dies zu erweisen, bedarf man des Hilfsmittels der *Abschnitte*. Ein Abschnitt A von F ist die wohlgeordnete Menge aller Elemente von F , die niederen Rang haben als ein bestimmtes Element f ; man sagt, dass A zum Element f gehört. Man beweist zunächst, dass die Abschnitte derselben Menge Grössencharakter besitzen, falls man $A < A'$ definiert, wenn A zu f , A' zu f' gehört und $f < f'$ ist. Sind nun F und G irgend zwei wohlgeordnete Mengen, so sind sie entweder einander ähnlich, oder es hat jeder Abschnitt A von F einen ihm ähnlichen Abschnitt B in G und es giebt einen Abschnitt B_1 von G , der F äquivalent ist, oder endlich es findet zwischen F und G das umgekehrte Verhältnis statt. Daraus folgt, dass für F und G stets eine der drei Beziehungen $\overline{F} = \overline{G}$, $\overline{F} < \overline{G}$, $\overline{F} > \overline{G}$ statthat.

29) Ursprünglich durch $\beta \cdot \alpha$ bezeichnet; Math. Ann. 21, p. 551.

30) So ist unter durchsichtiger Anwendung von Indices

$2 \cdot \omega = 1_1 2_1 2_2 \dots = \omega, \quad \omega \cdot 2 = 1_1 2_1 3_1 \dots 1_2 2_2 3_2 \dots = \omega + \omega,$
 endlich $\omega \cdot \omega = 1_1 2_1 3_1 \dots 1_2 2_2 3_2 \dots 1_3 2_3 3_3 \dots 1_n 2_n 3_n \dots$

31) Für den Inhalt von Nr. 6 vgl. Math. Ann. 49 (1897), p. 207

7. Die Ordnungszahlen und die Zahlklasse $Z(\aleph_0)$. Das vorstehende besagt, dass es einen und nur einen Typus W giebt, so dass jede wohlgeordnete Menge einem Abschnitt dieses Typus ähnlich ist. Diese Abschnitte, resp. ihre Ordnungstypen sind *Cantor's Ordnungszahlen*³²⁾; nach der Grösse geordnet bilden sie selbst wieder die Menge W . Die Abschnitte von W , die eine endliche Menge darstellen, die also durch das *erste* Erzeugungsprincip (Nr. 3) entstehen, liefern die erste Zahlklasse $Z(I)$ ³³⁾. Von den dann folgenden Abschnitten resp. Ordnungszahlen enthält die zweite Zahlklasse $Z(II) = Z(\aleph_0)$ diejenigen, die auf Grund des *ersten und zweiten* Erzeugungsprincips entstehen.

Das zweite Erzeugungsprincip fordert, dass zu jeder Reihe wachsender Ordnungszahlen $\alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_\nu < \dots$ („Fundamentalreihe“) eine *erste* nächstgrössere Zahl β existiert. Seine genauere Analyse führt zum Begriff der Limeszahlen, der der Irrationalzahl formal analog ist. Sind nämlich $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_\nu$ irgend welche Ordnungszahlen von $Z(\aleph_0)$, setzt man

$$\alpha_\nu = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_\nu,$$

so dass $\alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_\nu$, und definiert

$$\text{Lim } \alpha_\nu = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_\nu + \dots = \beta = \{\alpha_\nu\},$$

so ist 1) $\beta > \alpha_\nu$ für jedes ν , 2) falls $\beta' < \beta$, so giebt es stets Zahlen μ , so dass $\alpha_\mu > \beta'$. Diese Zahl β ist daher die auf alle α_ν der Grösse nach zunächst folgende Ordnungszahl. Wie für die Irrationalzahl gilt auch hier der Satz, dass zwei „Fundamentalreihen“ $\{\alpha_\nu\}$ und $\{\alpha'_\nu\}$ unter den bekannten Bedingungen dieselbe Zahl β darstellen.

Da jede abzählbare Menge abzählbarer Mengen selbst abzählbar ist, so stellt jede Zahl von $Z(\aleph_0)$ eine Menge der Mächtigkeit \aleph_0 dar; umgekehrt lässt sich $Z(\aleph_0)$ auch als Gesamtheit der Ordnungstypen wohlgeordneter abzählbarer Mengen definieren.

Zu jeder Zahl giebt es entweder eine unmittelbar vorhergehende (Zahl erster Art) oder sie ist eine Limeszahl β , für die es eine solche Zahl nicht giebt (Zahl zweiter Art).

8. Mengen höherer Mächtigkeit. Aus dem in Nr. 2 erwähnten Schlussverfahren folgt, dass die Menge $Z(\aleph_0)$ höhere Mächtigkeit als \aleph_0 hat. Überdies ist jede ihrer Teilmengen entweder einem Abschnitt der Menge oder der Menge selbst ähnlich und hat daher entweder die Mächtigkeit \aleph_0 oder die Mächtigkeit von $Z(\aleph_0)$ selbst. Daher stellt $Z(\aleph_0)$ eine Menge nächst höherer Mächtigkeit \aleph_1 dar³⁴⁾.

32) Für den Inhalt von Nr. 7 vgl. Math. Ann. 49, p. 211 ff.

33) Vgl. Math. Ann. 21, p. 547.

34) Cantor in Math. Ann. 49, p. 226 (vgl. auch Grundlagen p. 39).

Um zu Mengen beliebig hoher Mächtigkeit zu gelangen, kann man eine Methode benutzen, mit der *Cantor* neuerlich bewiesen hat, dass das Continuum höhere Mächtigkeit besitzt, als die natürliche Zahlenreihe³⁵⁾. Sie beruht darin, die Darstellung einer Zahl durch einen dyadischen Decimalbruch als Zuordnung der Ziffern 0 und 1 zur abzählbaren Zahlenmenge aufzufassen und zu zeigen, dass die Gesamtheit dieser Zuordnungen nicht abzählbar ist. Ebenso folgt, dass die Belegungsmenge jeder Menge M mit sich selbst höhere Mächtigkeit als M besitzt. Insbesondere hat die Gesamtheit aller Funktionen als Gesamtheit aller Zuordnungen der Zahlen des Continuum zu einander höhere Mächtigkeit als das Continuum. Dagegen ist die Gesamtheit aller analytischen sowie aller stetigen Funktionen nur die des Continuum³⁶⁾.

Die Thatsache, dass sich alle Ordnungszahlen ihrer Grösse nach in eine Reihe bringen lassen, hat *Cantor* zur Erweiterung des Abzählbarkeitsbegriffs geführt; er nennt die Mengen der Mächtigkeit \aleph_0 abzählbar durch Zahlen der zweiten Klasse³⁷⁾. Der hieran anschliessende Ausblick auf eine wohlgeordnete Menge von Zahlklassen resp. Mächtigkeiten $\aleph_0, \aleph_1, \aleph_2 \dots \aleph_\omega \dots$, so dass auf jede Mächtigkeit die *nächst-höhere* folgt, und jede höhere Klasse der Inbegriff der Ordnungstypen der vorhergehenden Klasse ist, entbehrt noch der Ausführung.

9³⁸⁾. Die allgemeinen Rechnungsgesetze der Ordnungszahlen.

Bedeutend $\alpha, \beta, \varphi, \psi \dots$ Zahlen von $Z(\aleph_0)$, ferner $\kappa, \lambda, \mu, \nu, \varrho, \sigma, \tau \dots$ Zahlen von $Z(1)$, so ergeben sich, wesentlich auf Grund dessen, dass 1) jeder Inbegriff von Zahlen von $Z(\aleph_0)$ eine kleinste besitzt und 2) jede Limeszahl die nächstgrössere zu allen Zahlen ihrer Fundamentalarie ist (Nr. 7), die folgenden Gleichungen

$$\begin{aligned} \nu_0 + \alpha &= \alpha, & \nu_0 \alpha &= \alpha, & (\alpha + \nu_0) \omega &= \alpha \omega \\ \omega^{\mu'} \nu' + \omega^{\mu} \nu &= \omega^{\mu} \nu, & \text{falls } \mu' < \mu, & \nu > 0, & \nu' > 0. \end{aligned}$$

Aus ihnen fliessen folgende zwei Hauptsätze: 1) Jede ganze algebraische Funktion endlichen Grades von ω lässt sich und dies nur auf eine Weise in die Form

$$\varphi = \omega^{\mu} \nu_0 + \omega^{\mu-1} \nu_1 + \dots + \nu_{\mu}; \quad \mu > 0, \quad \nu_0 > 0$$

bringen. 2) Ist

$$\varphi = \omega^{\mu} \kappa_0 + \omega^{\mu_1} \kappa_1 + \dots + \omega^{\mu_{\tau}} \kappa_{\tau}$$

35) Jahresber. d. deutsch. Math.-Ver. 1 (1891), p. 75.

36) *Cantor* in Math. Ann. 21 (1883), p. 590.

37) Math. Ann. 21, p. 549.

38) Die zu diesem Paragraphen aus Math. Ann. 49, p. 229 ff. citierten Sätze hat *Cantor* teilweise schon in Math. Ann. 21 (1883), p. 584 ff. ausgesprochen.

für $\mu > \mu_1 > \mu_2 \cdots > \mu_\tau \geq 0$, und jedes $\kappa_i > 0$, so lässt sich φ und zwar nur auf eine Art in Faktoren zerlegen,

$$\varphi = \omega^{\mu_\tau} \kappa_\tau (\omega^{\mu_\tau-1-\mu_\tau} + 1) \kappa_{\tau-1} \cdots (\omega^{\mu-\mu_1} + 1) \kappa_0. {}^{39)}$$

Für Exponenten, die der Klasse $Z(\aleph_0)$ angehören, lässt sich die Potenz durch folgenden Satz definieren. Sind ξ, γ, δ Zahlen von (I) oder (II) und ist $\delta > 0, \gamma > 1$, so giebt es eine und nur eine Funktion $f(\xi)$, die folgenden Bedingungen genügt: 1) $f(0) = \delta$, 2) $f(\xi) < f(\xi'')$, wenn $\xi < \xi''$, 3) $f(\xi + 1) = f(\xi)\gamma$, 4) $f(\xi) = \lim f(\xi_\nu)$, wenn $\xi = \lim \xi_\nu$. Die einfachste Funktion dieser Art ergibt sich für $\delta = 1$; wird sie durch γ^ξ bezeichnet, so gelten folgende Regeln:

$$\gamma^0 = 1, \quad \gamma^{\alpha+\beta} = \gamma^\alpha \gamma^\beta, \quad \gamma^{\alpha\beta} = (\gamma^\alpha)^\beta, \quad \gamma^\xi \geq \xi,$$

und es hat die oben definierte allgemeine Funktion $f(\xi)$ den Wert

$$f(\xi) = \delta \gamma^\xi.$$

10⁴⁰⁾. Die Normalform der Ordnungszahlen und die ε -Zahlen. Die Einführung des Potenzbegriffs führt zur Existenz einer Normalform der Zahlen von $Z(\aleph_0)$. Sie beruht auf dem Satze, dass sich jede Zahl α und dies nur auf eine Weise in die Form

$$\alpha = \omega^{\alpha_0} \kappa_0 + \alpha', \quad 0 \leq \alpha' < \omega^{\alpha_0}, \quad \alpha' < \alpha, \quad \alpha_0 \leq \alpha, \quad \kappa_0 > 0$$

bringen lässt. Die wiederholte Anwendung dieses Satzes liefert für α die Normalform

$\alpha = \omega^{\alpha_0} \kappa_0 + \omega^{\alpha_1} \kappa_1 + \cdots + \omega^{\alpha_\tau} \kappa_\tau$, $\alpha_0 > \alpha_1 > \cdots > \alpha_\tau \geq 0$, alle $\kappa_i > 0$. α_0 heisst Grad, α_τ Exponent von α . Je nachdem $\alpha_\tau \geq 0$, ist α eine Zahl erster oder zweiter Art (Nr. 7). Die oben (Nr. 9) erwähnte Zerlegung einer Zahl φ gilt auf Grund der Normalform auch für beliebiges α :

$$\alpha = \omega^{\alpha_\tau} \kappa_\tau (\omega^{\alpha_\tau-1-\alpha_\tau} + 1) \kappa_{\tau-1} \cdots (\omega^{\alpha_0-\alpha_1} + 1) \kappa_0;$$

die Zahlen $\omega^\gamma + 1$ sind unzerlegbar und heissen *Primzahlen*. Insbesondere ist jede Limeszahl von der Form $\alpha = \omega^\gamma \alpha'$, wo $\gamma_0 > 0$.

Während im allgemeinen der Grad $\alpha_0 < \alpha$, so giebt es Zahlen, für die $\alpha_0 = \alpha$ und daher α Wurzel der Gleichung $\omega^\xi = \xi$ ist. Ihre Existenz ergibt sich aus folgendem Satz: Ist γ eine Zahl, die dieser Gleichung nicht genügt, so bestimmen die Zahlen

39) Cantor benutzt a. a. O. diese Sätze, um aus ihnen Formeln für Produkt und Summe von zwei Ordnungszahlen abzuleiten.

40) Für den Inhalt dieses Paragraphen vgl. Math. Ann. 49, p. 235 ff. Cantor knüpft dort wieder Formeln für Summe und Produkt an, und giebt die notwendige und hinreichende Bedingung, dass $\alpha + \beta = \beta + \alpha$, resp. $\alpha\beta = \beta\alpha$ ist. Im ersten Fall ist $\alpha = \gamma\mu$, $\beta = \gamma\nu$, im zweiten $\alpha = \gamma^\mu$, $\beta = \gamma^\nu$.

$$\gamma, \gamma_1 = \omega^\gamma, \gamma_2 = \omega^{\gamma_1} \dots, \gamma_r = \omega^{\gamma_{r-1}} \dots$$

eine Fundamentalreihe $\{\gamma_\nu\}$ und es ist $\text{Lim } \gamma_\nu$ eine derartige Zahl und heisst eine ε -Zahl; $E(\gamma) = \text{Lim } \gamma_\nu$. Von ihnen gilt: 1) die kleinste ε -Zahl ist $E(1) = \text{Lim } \omega_\nu$, wo $\omega_1 = \omega$, $\omega_2 = \omega^{\omega_1}$, $\omega_\nu = \omega^{\omega_{\nu-1}} \dots$; 2) ist ε' eine ε -Zahl, so ist $E(\varepsilon' + 1)$ die nächst grössere; 3) ist ε'' die zu ε' nächstgrössere Zahl und ist $\varepsilon' < \gamma < \varepsilon''$, so ist $E(\gamma) = \varepsilon''$; 4) sind $\varepsilon' < \varepsilon'' < \dots \varepsilon^{(\nu)} \dots$ sämtlich ε -Zahlen, so ist auch $\text{Lim } \varepsilon^{(\nu)}$ eine ε -Zahl und zwar diejenige, die auf alle $\varepsilon^{(\nu)}$ als nächstgrössere folgt. Die Gesamtheit der ε -Zahlen bildet daher eine wohlgeordnete Menge, die der Menge $Z(\aleph_0)$ ähnlich ist.

Die Gleichung $\alpha^\varepsilon = \xi$ hat keine andern Wurzeln als die ε -Zahlen, die grösser sind als α ; jede von ihnen genügt den drei Gleichungen:

$$\alpha + \varepsilon = \varepsilon, \quad \alpha \varepsilon = \varepsilon, \quad \alpha^\varepsilon = \varepsilon.$$

11. Allgemeine Definitionen und Formeln für Punktmengen.

Für die Unterscheidung der Punktmengen kommen in arithmetischer Hinsicht ihre Ableitungen, in geometrischer ihre Lage in einem als *stetig* vorausgesetzten Raume in Betracht. Geometrischer Natur sind folgende Definitionen⁴¹⁾. Ein Punkt p heisst isolierter⁴¹⁾ Punkt von P , wenn man um ihn einen Bereich abgrenzen kann, der keinen weiteren Punkt von P enthält. Sind alle Punkte der Menge P isolierte Punkte, so heisst sie selbst isoliert⁴¹⁾. Ist im Intervall $a \dots b$ kein von Punkten freies Intervall vorhanden, so heisst P in diesem Intervall *überall dicht*⁴²⁾ (pantachisch⁴³⁾); alsdann enthält P' alle Punkte des Intervalls.

Das Verhältnis der Menge P zu ihren Ableitungen⁴⁴⁾ (Nr. 1) hat Cantor zu folgenden Festsetzungen geführt⁴⁵⁾. Die Menge heisst *abgeschlossen*, wenn sie jeden Grenzpunkt enthält; sie heisst *in sich dicht*, wenn jeder ihrer Punkte ein Grenzpunkt ist; sie heisst *separiert*, wenn kein Bestandteil in sich dicht ist; zu den separierten Mengen gehören z. B. die isolierten Mengen und die abgeschlossenen Mengen der ersten Mächtigkeit⁴⁶⁾. Die Menge P heisst endlich *perfekt*⁴⁷⁾, wenn $P = P'$ ist, sie ist dann zugleich abgeschlossen und in sich dicht. Ferner

41) Math. Ann. 21, p. 51.

42) Nach Cantor, Math. Ann. 15, p. 2.

43) Diese Bezeichnung stammt von du Bois; Math. Ann. 15 (1879), p. 287.

44) G. Peano hat für lineare Punktmengen links genommene, resp. rechts genommene Ableitungen eingeführt. Riv. di mat. 4 (1894), p. 34.

45) Math. Ann. 23, p. 470 ff.

46) Math. Ann. 23, p. 472.

47) Math. Ann. 21 (1883), p. 575.

heisst P erster Art und ν ter Gattung⁴⁸⁾, falls $P^{(\nu)}$ die letzte vorhandene Ableitung ist; sie heisst dagegen zweiter Art⁴⁸⁾, wenn Ableitungen transfiniten Ordnungszahlen existieren, wie z. B. bei perfekten Mengen.

Da die Punkte von $P^{(\nu)}$ sämtlich in $P^{(\nu-1)}$ enthalten sind, so kann man folgende Identität aufstellen⁴⁹⁾:

$$P' = (P' - P'') + (P'' - P''') + \dots + (P^{(\nu-1)} - P^{(\nu)}) + P^{(\nu)}.$$

Diese Identität kann bis zu Zahlen von $Z(\text{II})$ fortgesetzt werden, und wenn man die allen $P^{(\alpha)}$ gemeinsame Menge, falls sie existiert, durch $P^{(\Omega)}$ bezeichnet⁵⁰⁾, so dass $P^{(\Omega)} = \mathfrak{D}(P', P'', \dots P^{(\alpha)} \dots)$ ist, so folgt

$$P' = \sum \{P^{(\gamma)} - P^{(\gamma+1)}\} + P^{(\Omega)}, \quad \gamma = 0, 1 \dots \omega \dots \alpha \dots$$

Wesentlich ist, dass jede Klammer eine *isolierte* Menge darstellt.

12. Allgemeine Lehrsätze über Punktmengen. Die Einteilung der Punktmengen nach der Mächtigkeit, insbesondere die Entscheidung der Frage, ob sie abzählbar sind oder nicht, hat *Cantor* bereits früh in Angriff genommen. Die Untersuchung beruht auf folgenden Hülfsätzen: 1) Jede im unbegrenzten R_n enthaltene Menge von getrennten oder nur an den Begrenzungen zusammenstossenden stetigen Teilgebieten ist abzählbar⁵¹⁾. 2) Ist für die Mengen Q und R sowohl $\mathfrak{D}(Q, R) = 0$ als $\mathfrak{D}(Q', R) = 0$ und liegt in jedem Teilgebiet H eines R_n , das weder Punkte von Q noch von Q' enthält, eine endliche oder abzählbare Menge von Punkten von R , so ist R selbst endlich oder abzählbar⁵²⁾. 3) Sind $d_1, d_2 \dots$ der Grösse nach geordnete Intervalle im Intervall $0 \dots 1$, so kann jede Punktmenge $\{\psi\}$ des Intervalls $0 \dots 1$, die überall dicht ist und die erste Mächtigkeit besitzt, in eine solche Reihe gebracht werden, dass je zwei Punkte ψ_μ und ψ_ν die gleiche Lage zu einander haben, wie die Intervalle d_μ und d_ν ⁵³⁾.

Mittelst der Sätze 1) und 2) und auf Grund davon, dass jede abzählbare Menge abzählbarer Punktmengen selbst abzählbar ist, er-

48) Math. Ann. 15, p. 2. Beispiele von Mengen erster Art und ν ter Gattung, in denen $P^{(\nu)}$ gegebene Punkte enthält, finden sich z. B. bei *G. Ascoli*, *Line. Mem.* (3) 2 (1878), p. 584, sowie *U. Dini*, *Fondamenti* p. 17. Vgl. auch *G. Mittag-Leffler* in *C. R.* 94 (1882), p. 939, sowie *du Bois*, *Functionenlehre* p. 186.

49) Math. Ann. 21, p. 51 ff. und 23, p. 463 ff.

50) Ω ist der Ordnungstypus aller Zahlen der Klasse $Z(\aleph_0)$ in ihrer natürlichen Reihenfolge, und wird gemäss Nr. 8 von *Cantor* auch als erste Zahl der dritten Zahlklasse bezeichnet; Math. Ann. 21, p. 582.

51) Math. Ann. 20, p. 117.

52) Math. Ann. 23, p. 457.

53) Math. Ann. 23, p. 482.

geben sich folgende Theoreme⁵⁴): 1) Jede separierte Punktmenge ist abzählbar. 2) Ist P' abzählbar, so ist auch P abzählbar. 3) Ist für eine Zahl α von $Z(I)$ oder $Z(II)$ $P^{(\alpha)} = 0$, so ist P' und P abzählbar oder endlich, umgekehrt, ist P' abzählbar, so giebt es eine erste Zahl α , so dass $P^{(\alpha)} = 0$ ist. Punktmengen dieser Art sind daher durch ihre Ableitungen im wesentlichen charakterisiert. 4) Ist P' von höherer als der ersten Mächtigkeit, so giebt es stets Punkte, die allen $P^{(\alpha)}$ angehören und ihr Inbegriff $S = P^{(\Omega)}$ ist perfekt; zugleich ist $P' = P^{(\Omega)} + R$, wo R eine separierte Menge ist. Ferner giebt es dann bereits eine kleinste transfinite Zahl α erster Art (Nr. 7), so dass $P^{(\alpha)} = P^{(\alpha+1)} = P^{(\Omega)}$. Die Menge R hat überdies die Eigenschaft, dass $\mathfrak{D}(R, R^{(\omega)}) = 0$ ist⁵⁵).

Eine Menge, für die es ein α giebt, so dass $P^{(\alpha)} = 0$ ist, heisst *reductibel*; sie lässt sich (Nr. 11) durch successive Abtrennung isolierter Mengen erschöpfen. Ist dagegen P' von höherer Mächtigkeit, so führt diese Abtrennung schliesslich zu einer Restmenge, die perfekt ist. Für diese Charakteristik der Punktmengen bilden also die Zahlen von $Z(II)$ das notwendige und hinreichende Beweismittel.

13. Die abgeschlossenen und perfekten Mengen. Wie die erste Ableitung einer Punktmenge eine abgeschlossene Menge ist, so lässt sich auch umgekehrt jede abgeschlossene Menge auf unendlich viele Arten als Ableitung einer andern Menge darstellen⁵⁶). Die Sätze des vorigen Paragraphen, die bei beliebigen Mengen an die Ableitung P' anknüpfen, gelten daher, falls P abgeschlossen ist, für P selbst. Ferner gilt, dass eine abgeschlossene Menge entweder von der ersten Mächtigkeit und also reductibel ist oder die Mächtigkeit des Linearcontinuuums besitzt. (Da $P = R + S$, wo S perfekt; vgl. unten.)

Da die perfekten Mengen jeden Grenzpunkt enthalten, so folgt aus dem Hauptschlussverfahren (Nr. 2), dass sie von höherer als der ersten Mächtigkeit sind⁵⁷). Unter ihnen haben diejenigen besonderes

54) Vgl. Math. Ann. 21 (1883), p. 51, und 23 (1884), p. 461; ferner *Bendixson* in Acta mat. 2 (1883), p. 415.

55) Dieser Zusatz stammt von *Bendixson* (vgl. Anm. 54); zugleich findet sich a. a. O. ein lehrreiches Beispiel. Einen Beweis des Satzes 4) für Punktmengen im R_n gab *E. Phragmén* in Acta mat. 5 (1885), p. 47.

56) Math. Ann. 23, p. 470. Ist $Q = (q_1 q_2 \dots)$ die Adhärenz (vgl. Nr. 14) von P , und setzt man in eine um q_v gelegte Kugel, die ausser q_v keinen Punkt von Q enthält, eine Menge P_v so, dass $P'_v = q_v$ ist, so ist P die Ableitung von $P' + \Sigma P_v$.

57) Math. Ann. 23, p. 459.

Interesse, die nirgends überall dicht (apantachisch) sind⁵⁸). Mit ihrer Hülfe hat *Cantor* auf Grund des Theorems 3 von Nr. 12 gezeigt, dass alle perfekten Mengen die Mächtigkeit des \mathfrak{C} besitzen⁵⁹). *Harnack* hat zuerst bemerkt, dass man das \mathfrak{C}_1 auf eine nirgends überall dichte Menge P so eineindeutig abbilden kann, dass sogar die Grössenordnung in beiden Mengen dieselbe ist⁶⁰). Die von ihm aufgestellte Bedingung ist von *Bettazzi*⁶¹) genauer gefasst worden. Eine perfekte Menge ist demzufolge notwendig stetig, wenn sie überall dicht ist.

Eine nirgends überall dichte perfekte lineare Menge ist stets Ableitung einer isolierten Menge, die aus Endpunkten gewisser Intervalle besteht⁶²). *L. Scheeffer* hat den allgemeineren Satz⁶³), dass, wenn eine Reihe von Intervallen vorliegt, die einander ausschliessen, alle Punkte, die nicht im Innern eines solchen Intervalles liegen, eine perfekte Menge bilden; umgekehrt ist auch jede perfekte Menge so darstellbar. Nach einem andern Satz von *L. Scheeffer*⁶³) kann man, falls P eine nirgends überall dichte perfekte Menge und R eine abzählbare Menge ist, alle Punkte von P um geeignete Strecken so verschieben, dass keiner mit einem Punkt von R zusammenfällt. Es giebt also perfekte Mengen, die nur aus irrationalen Punkten bestehen.

14. Zerlegung einer Menge in separierte und homogene Bestandteile. Die Theorie der Punktmengen hat *Cantor*⁶⁴) neuerlich durch Einführung der Begriffe der Adhärenz, Cohärenz und der homogenen Menge weiter gefördert. Diese Begriffe tragen dem Umstand Rechnung, dass die Mächtigkeit des \mathfrak{C} noch nicht geklärt ist und man daher Punktmengen beliebiger Mächtigkeit zulassen muss. Die *Cohärenz* Pc einer Menge P ist die Gesamtheit der ihr angehörigen Grenz-

58) Diese Mengen treten in den verschiedensten Gebieten auf. Beispiele gab zuerst 1882 *A. Harnack* in Math. Ann. 19, p. 239 u. 23 (1884), p. 285, ferner *Cantor* daselbst 21, p. 590, *Bendixson* in Acta mat. 2 (1883), p. 427 u. a. Vgl. auch *R. Fricke*, Math. Ann. 44 (1894), p. 565. Vgl. auch Anm. 60 und 62.

59) Math. Ann. 23, p. 488. Vgl. *Bendixson* Bih. Sv. Vet. Handl. 9, Nr. 6.

60) Math. Ann. 23 (1884), p. 285. Diese Mengen erhält man am einfachsten, indem man von der Dezimalbruchdarstellung jeder Zahl ausgeht, und deren Ziffern Gesetze oder Beschränkungen auferlegt; vgl. *Cantor* in Math. Ann. 21, p. 590, *Peano* in Riv. di mat. 2 (1892), p. 43, *Schönflies* in Gött. Nachr. 1896, p. 255.

61) Ann. di mat. (2), 16 (1888), p. 49.

62) Dementsprechend kann man die oben genannten nirgends überall dichten perfekten Mengen auch so erhalten, dass man in ein Intervall eine Strecke einträgt, die von Punkten frei bleiben soll, in jedes der beiden übrigen Teilintervalle neue Strecken dieser Art u. s. w., und die Ableitung der so bestimmten Punktmenge bildet. Vgl. Anm. 58.

63) Acta mat. 5 (1885), p. 288 ff.

64) Für den Inhalt dieses Paragraphen vgl. Acta mat. 7 (1885), p. 105 ff.

punkte und enthält jede in sich dichte Teilmenge von P . Die übrigen, notwendig isolierten Punkte bilden die *Adhärenz* Pa . Da die Cohärenz Pc selbst wieder in eine Adhärenz Pca und eine Cohärenz Pc^2 gespalten werden kann, so dass $Pc = Pca + Pc^2$ ist, so ergibt sich bei fortgesetzter Spaltung (analog Nr. 11)

$$P = Pa + Pca + Pc^2a + \dots + Pc^{\gamma-1}a + Pc^{\gamma},$$

resp. bei Fortsetzung bis zu transfiniten Zahlen

$$P = \sum_{\alpha} Pc^{\alpha}a + Pc^{\gamma} \quad (\alpha = 0, 1 \dots \omega \dots < \gamma),$$

wo für γ auch Ω eintreten kann. Jeder in sich dichte Bestandteil von P gehört allen Cohärenzen gemeinsam an, während jede Adhärenz $Pc^{\gamma}a$ isoliert und $\sum Pc^{\gamma}a$ eine separierte Menge ist. Die in sich dichten Mengen heissen *homogen*, falls ihre Bestandteile in der Umgebung jedes Punktes gleiche Mächtigkeit haben.

Aus den obigen Formeln folgt: 1) Jede Menge erster Mächtigkeit zerfällt in zwei ihrer Natur nach verschiedene Bestandteile, von denen einer 0 sein kann, nämlich $P = R + U$, wo R separiert, U dagegen in sich dicht und homogen ist, und es giebt eine kleinste Zahl α so, dass $U = Pc^{\alpha} = Pc^{\Omega}$ ist. 2) Ist P von höherer als der ersten Mächtigkeit, so hat man im allgemeinen drei Bestandteile, $P = R + U + V$, zu unterscheiden, wo R und U die vorige Bedeutung haben, V eine Menge höherer Mächtigkeit darstellt und wiederum $U + V = Pc^{\alpha} = Pc^{\Omega}$ ist. Lässt man Mengen beliebiger Mächtigkeit zu, so hat V die Form $V = \sum Pi_{\beta}$, wo Pi_{β} eine homogene Menge β ter Mächtigkeit ist. Die Menge Pi_{β} heisst auch die β te *Inhärenz* von P ,⁶⁵⁾ $U + V = \sum Pi_{\beta}$ ($\beta = 1, 2 \dots$) heisst die totale Inhärenz. R heisst Rest oder Residuum von P .

15. Der Inhalt von Punktmengen. Die Erörterungen über den *Inhalt* von Punktmengen haben sich zuerst an die Theorie der Integrale und Fourier'schen Reihen, resp. an die mögliche Verteilung ihrer Unstetigkeiten angeschlossen (II A 1, 3, 8). *H. Hankel*⁶⁶⁾ hat zuerst die von Punkten einer Menge freie Intervallmenge zu bestimmen gesucht, freilich nicht fehlerfrei. Er meinte irrtümlich, dass sie stets gleich dem Gesamtintervall ist, falls die Menge nirgends überall dicht ist. *St. Smith*⁶⁷⁾

65) Cantor nennt die Punkte von Pi_{β} Punkte β ter Ordnung, diejenigen von $Pc^{\alpha}a$ Punkte α ter Art. Aus der Existenz von Punkten α ter Art folgt diejenige der niederen Art; für die Inhärenzen besteht ein solches Verhältnis nicht.

66) Univ.-Progr. Tübingen 1873, p. 25 (Über die unendlich oft unstetigen und oscillirenden Funktionen), sowie Math. Ann. 20, p. 87.

67) Lond. Math. Soc. Proc. 6 (1875), p. 148.

und nach ihm *du Bois*, *Harnack*⁶⁸⁾ und *W. Veltmann*⁶⁹⁾ haben wohl zuerst erkannt, dass es Mengen giebt, die nirgends überall dicht sind und deren freie Intervallsumme jedem Wert $\lambda \leq d$ beliebig nahe gebracht werden kann, wenn d das sie enthaltende Intervall ist⁷⁰⁾. Für $\lambda = d$ heisst die Punktmenge nach *du Bois* integrierbar⁷¹⁾. *U. Dini*⁷²⁾ und *Ascoli*⁷³⁾ zeigten 1878, dass jede Menge P integrierbar ist, wenn für endliches ν $P^{(\nu)} = 0$ ist.

Die Existenz eines festen Grenzwertes für die Summe der Intervalle, in denen Punkte einer Menge P liegen, wurde für beliebige Mengen zuerst von *O. Stolz*⁷⁴⁾ und später von *Harnack*⁷⁵⁾ nachgewiesen. Bald darauf gab *Cantor*⁷⁶⁾ seine den Inhaltsbegriff im R_n betreffenden allgemeinen Definitionen. Wesentlich für sie ist, dass man zur Menge P die ihr nicht angehörigen Grenzpunkte hinzufügt. Legt man alsdann um jeden Punkt der so erweiterten Menge P eine Kugel $K(\varrho)$, so hat das kleinste von allen diesen Kugeln zugleich erfüllte Volumen für $\varrho = 0$ einen bestimmten, nicht negativen Grenzwert; ihn bezeichnet *Cantor* als Inhalt $I(P)$ von P . Es ist $I(P) = I(P') = I(P'')$, wo γ irgend eine transfinite Zahl ist.

Aus vorstehender Definition folgt, dass wenn P' abzählbar ist, $I(P) = 0$ ist⁷⁷⁾; ebenso ist $I(R) = 0$, wenn R reductibel ist. Da eine beliebige Menge P' sich in die Mengen $R + S$ spalten lässt, wo $\mathfrak{D}(RR^a) = 0$ (Nr. 12) reductibel und S perfekt ist, so ist $I(P) = I(S)$, so dass die Inhaltsbestimmung nur für perfekte Mengen in Frage steht. Auch perfekte Mengen können den Inhalt 0 haben⁷⁸⁾.

Nachdem bereits *Harnack*⁷⁹⁾ auf den Einfluss hingewiesen, den die Grenzpunkte für den Inhalt haben können, haben *Peano*⁸⁰⁾ und *C.*

68) Math. Ann. 16 (1880), p. 128 und 19 (1882), p. 239.

69) Zeitschr. f. Math. 27 (1882), p. 178, 193, 313. Vgl. auch *V. Volterra*, Giorn. di Mat. 19 (1881), p. 76.

70) Das Konstruktionsprincip dieser Mengen ist bei allen Autoren das gleiche und identisch mit dem in Anm. 62 genannten.

71) Allgem. Fktlehre, p. 189. *Harnack* sagt in wenig guter Bezeichnung *diskret* und nennt Mengen, für die $\lambda < d$ ist, *linear*. (Math. Ann. 19, p. 238.)

72) Fondamenti p. 18.

73) Atti Linc. (3) 2, p. 586.

74) Math. Ann. 23 (1884), p. 152.

75) Math. Ann. 25 (1885), p. 241; vgl. auch *Pasch* in Math. Ann. 30 (1887), p. 132.

76) Math. Ann. 23 (1884), p. 473.

77) Diesen Satz gab *Cantor* bereits 1883 in Math. Ann. 21, p. 54.

78) Solche Mengen sind z. B. die oben erwähnten für $\lambda = d$.

79) Math. Ann. 25, p. 243.

80) Applicazioni geom. del calc. etc. (1887), p. 152.

*Jordan*⁸¹⁾ dem Inhaltsbegriff eine präzisere Formulierung gegeben, die für ebene Punktmengen so lautet: Zerlegt man die Ebene in Quadrate mit der Seite r und ist S die Summe aller Quadrate, deren sämtliche Punkte P angehören, ist ferner $S + S'$ die Summe der Quadrate, die überhaupt Punkte oder Grenzpunkte von P enthalten, so convergieren S und $S + S'$ gegen feste, von der Teilung unabhängige Grenzen I und A . Für $I = A$ heisst P messbar und $I = A$ ihr Inhalt. Ist $I < A$, so unterscheiden *Peano* und *Jordan* einen innern und äussern Inhalt.

Ist P' abzählbar, so ist P messbar und hat den Inhalt 0, insbesondere also auch jede *reductible* Menge. Ist P abzählbar, aber P' von höherer Mächtigkeit, so ist jedenfalls die innere Fläche Null⁸²⁾.

16. Das Continuum. Den Ordnungstypus des \mathfrak{C}_1 hat *Cantor* dahin bestimmt, dass es eine perfekte Menge M ist, die eine Menge S der Mächtigkeit \aleph_0 (die rationalen Zahlen) so enthält, dass zwischen zwei Elementen von M unzählig viele Elemente von S liegen⁸³⁾. Als diejenige Eigenschaft, welche eine perfekte Menge zum Continuum macht, hat *Cantor* die auf dem geometrischen Stetigkeitsbegriff ruhende Eigenschaft des Zusammenhangs aufgestellt⁸⁴⁾; d. h. sind p und q zwei Punkte der Menge, so giebt es eine endliche Zahl von Zwischenpunkten p_1, p_2, \dots, p_n , so dass die Entfernung zweier benachbarter beliebig klein ausfällt; er definiert daher das Continuum als perfekt zusammenhängende Menge⁸⁵⁾.

Für den Satz, dass die Mächtigkeit des \mathfrak{C}_n und sogar des \mathfrak{C}_{\aleph_0} dieselbe ist, wie die des \mathfrak{C}_1 , hat *Cantor* einen neuen einfachen Beweis gegeben, der sich auf das Rechnen mit Mächtigkeiten stützt⁸⁶⁾. Der Satz, dass das \mathfrak{C} von der zweiten Mächtigkeit ist, harrt noch immer des Beweises; trifft er zu, so müssen sich alle Zahlen zwischen 0

81) Cours d'analyse (2), Paris 1893, 1, p. 28, sowie J. d. Math. (4) 8 (1892), p. 79.

82) *C. Garibaldi* in Palermo Rend. 8 (1894), p. 157.

83) Math. Ann. 46, p. 510.

84) Math. Ann. 21, p. 575. *Bolzano* (Paradoxieen § 38) nahm an, dass diese Eigenschaft allein ausreiche. *Dedekind's* im Schnittprincip enthaltene Definition kommt, auf die Gesamtheit der rationalen Zahlen angewandt, auf das gleiche hinaus, wie diejenige *Cantor's*. Vgl. jedoch Nr. 17.

85) Eine zusammenhängende nicht perfekte Menge nennt *Cantor* ein *Semicontinuum* (Math. Ann. 21, p. 590).

86) Math. Ann. 46, p. 488. Eine merkwürdige Folge der Thatsache, dass das Continuum seine Mächtigkeit behält, wenn man daraus abzählbare Mengen entfernt, ist die, dass man aus dem stetigen R_n abzählbare Punktmengen entfernen kann, ohne dass dadurch eine stetige Bewegung unmöglich wird (*Cantor* in Math. Ann. 20, p. 121).

und 1 auf die Ordnungszahlen der Klasse $Z(\aleph_0)$ eindeutig beziehen lassen. Die Fragen über Abbildung der Continua haben in neuerer Zeit weitere Fortschritte gemacht. *Peano* hat 1890 gezeigt, dass man die Abbildung des \mathfrak{C}_2 auf das \mathfrak{C}_1 auch stetig herstellen kann, falls man die Eineindeutigkeit opfert⁸⁷⁾. Bald darauf hat *D. Hilbert* für den gleichen Satz eine geometrische Methode gegeben⁸⁸⁾.

Auch für die Geometrie ist die Mengenlehre massgebend geworden⁸⁹⁾; *E. Maccaferri* hat jedoch auf einen merkwürdigen Unterschied hingewiesen, der zwischen dem *Cantor'schen* Begriff des Continuum und den durch Gleichungen gegebenen continuierlichen Gebilden stattfindet. Sind im R_n die Coordinaten $x_1 \dots x_n$ stetige Funktionen von t , so stellt zwar der Inbegriff aller zugehörigen Punkte eine continuierliche Menge im *Cantor'schen* Sinne dar, aber umgekehrt kann, sobald $n \geq 2$ ist, ein *Cantor'sches* Continuum nicht immer durch derartige Gleichungen dargestellt werden; die bei *Cantor* der Menge notwendig angehörenden Grenzpunkte brauchen nämlich durch das Funktionensystem nicht dargestellt zu werden⁹⁰⁾.

*Bendixson*⁹¹⁾ und *Phragmén*⁹²⁾ haben sich mit Eigenschaften von Punktmengen beschäftigt, welche die volle Grenze eines ebenen \mathfrak{C}_2 bilden können und zwar besonders mit Rücksicht auf *Mittag-Leffler's* Untersuchungen über die Theorie der eindeutigen Funktionen⁹³⁾.

G. Ascoli und *C. Arzelà* haben begonnen, die Begriffe der Mengenlehre auf Mannigfaltigkeiten von Kurven zu übertragen⁹⁴⁾.

17. Die Unendlich (\aleph) der Funktionen. Die Erörterungen über die arithmetische Natur des \mathfrak{C} haben zu einer Erweiterung des

87) Math. Ann. 36, p. 157. *Peano* drückt sich so aus, dass die abbildenden Gleichungen $x=f(s)$, $y=f(s)$ eine Curve bestimmen, die eine Fläche erfüllt. Die Methode entspricht der in Anm. 60 erwähnten.

88) Math. Ann. 38 (1891), p. 459 ff. Ein einfaches Princip der Abbildung findet sich bei *Schönflies*, Gött. Nachr. 1896, p. 255.

89) Vgl. besonders den Cours d'analyse von *C. Jordan*, Bd. 1, sowie *W. Killing*, Grundlagen der Geometrie 2, 1898 (Paderborn).

90) Ein einfaches Beispiel liefert die Gleichung $y = \sin \frac{1}{x}$ für $0 < x \leq M$. Die durch sie definierten Punkte stellen ein *Cantor'sches* Continuum nur dann dar, wenn die Punkte der y -Axe zwischen $+1$ und -1 hinzugefügt werden. Diese Punktmenge lässt sich aber nicht so darstellen, dass x und y stetige Funktionen von t werden. Vgl. Riv. di mat. 6 (1896), p. 97.

91) Stockh. Handl. Bih. 9 (1885), Nr. 7.

92) Acta mat. 7 (1885), p. 43.

93) Vgl. Acta mat. 4 (1884), p. 10.

94) *Ascoli* in Linc. Mem. (3) 18 (1884), p. 251 und *Arzelà* in Linc. Rend. (4) 5 (1889), p. 342.

Grössenbegriffs geführt. Ausser den (reellen) Zahlen giebt es noch andere, mächtigere Systeme von Individuen, die den allgemeinen Grössengesetzen (Nr. 4) gehorchen. Das Kennzeichen der gewöhnlichen Zahlenlehre ist, wie *Stolz*⁹⁵⁾ bemerkt hat, die von *Archimedes* als Postulat aufgestellte Forderung, dass, falls $A < B$ ist, immer eine ganze Zahl m existiert, so dass $mA > B$ ist. Die bezüglichlichen allgemeineren Grössensysteme genügen dieser Forderung nicht. Nachdem bereits *Is. Newton*⁹⁶⁾ sich mit Grössensystemen dieser Art beschäftigt hat, sind solche in neuerer Zeit besonders von *Stolz* und *P. du Bois* betrachtet worden. Die *Momente* von *Stolz*⁹⁷⁾ knüpfen sich an Funktionen $f(x)$, deren jede, für $\lim x = +a$ beständig positiv bleibend, den Grenzwert 0 hat; auch soll jede rationale Funktion beliebig vieler von ihnen einen bestimmten Grenzwert besitzen. Ein einfaches System dieser Art bilden die reciproken Werte der Funktionen

$x_1, E_1(x) = e^x, E_2(x) = e^{E_1(x)} \dots, L_1(x) = \lg(x), L_2(x) = \lg L_1(x) \dots$ für $\lim x = \infty$. Jeder Funktion $f(x)$ lässt sich ein „Moment“ $u(f)$ so zuordnen, dass $u(f) \geq u(g)$ ist, je nachdem für $\lim x = +a$ $\lim (f:g) \geq 1$ ist. Diese Momente genügen den Grössenbeziehungen und gestatten Addition und Multiplikation, bei gehöriger Erweiterung sogar auch die Division, jedoch nicht durchgehend die Subtraktion.

Ein zweites Grössensystem dieser Art bilden *du Bois'* „Unendlich⁹⁸⁾ (U) der Funktionen“. Wenn $f(x)$ und $\varphi(x)$ mit x monoton ins Unbegrenzte wachsen und für $\lim x = +\infty$ der Quotient $f(x):\varphi(x)$ den Grenzwert ∞ oder 0 hat, so hat nach *du Bois* $f(x)$ ein grösseres oder kleineres U als $\varphi(x)$ ($f > \varphi$ resp. $f < \varphi$); wenn dieser Grenzwert von 0 und ∞ verschieden ist, so haben f und φ gleiches U ($f \sim \varphi$). Der Gegensatz dieses Grössensystems zu den Zahlen drückt sich in folgenden zwei Sätzen aus: 1) Es giebt weder ein oberstes noch ein niederstes U, d. h. wie auch eine Reihe von wachsenden (resp. abnehmenden) Unendlich gegeben sein mag, so kann man immer Funktionen konstruieren, deren U höher resp. niederer ausfällt, als die gegebenen (analog zur zweiten Zahlklasse, resp.

95) Math. Ann. 18 (1881), p. 269, Anm..

96) Philos. natur. princ. lib. I sect. I, lemma XI, Anm. Vgl. auch *Vivanti* in *Bibl. mat.* 5 (1891), p. 97.

97) *Stolz*, Vorlesungen über Arithmetik 1 (Leipzig 1885), p. 205. Eine andere ebenfalls mögliche Definition findet sich p. 213.

98) Math. Ann. 8 (1875), p. 363 ff. sowie 11 (1877), p. 149. In der ersten Abhandlung werden zugleich die Unendlich für einzelne Funktionen bestimmt, die mit andern durch Funktionalgleichungen verbunden sind.

zum zweiten Erzeugungsprincip). 2) Es ist (im Gegensatz zur Theorie der Irrationalzahl) unmöglich, sich einem gegebenen $\mathbb{U} \lambda(x)$ durch eine abzählbare Funktionenfolge $\varphi_p(x)$ so anzunähern, dass man nicht stets beliebig viele Funktionen $\psi(x)$ angeben könnte, deren \mathbb{U} für beliebiges p zwischen $\lambda(x)$ und $\varphi_p(x)$ fällt.

Die Thatsache, dass man sich jedes gegebene $\mathbb{U} \lambda(x)$ unter dem Bilde eines Punktes der unendlich fernen Geraden (nämlich des Punktes der Curve $y = \lambda(x)$ für $x = \infty$) vorstellen kann, hat *du Bois* zu dem *Postulat* der *infinitären Pantachie*⁹⁹⁾ geführt, die aus der Gesamtheit der \mathbb{U} aller Funktionen so entstehen soll, dass jeder *Dedekind'schen* Zweiteilung (I A 3) der Unendlich ein neues \mathbb{U} entspricht. Doch ist zu bemerken, dass es nicht möglich ist, die \mathbb{U} aller Funktionen als ein Grössensystem (im Sinn von Nr. 4) aufzufassen¹⁰⁰⁾.

Auf Grund davon, dass mit den Funktionen $f(x)$ auch die Funktionen $\lg f(x)$ für $\lim x = \infty$ ein System ins Unbegrenzte wachsender Funktionen bilden, hat *S. Pincherle*¹⁰¹⁾ die Definition der Unendlich folgendermassen verallgemeinert. Ist $F(x)$ eine Funktion wie $f(x)$, so soll, falls die Differenz $\delta(x) = F(f(x)) - F(\varphi(x))$ für $\lim x = \infty$ positiv unendlich wird, $f > \varphi$ sein, falls sie endlich bleibt, $f \sim \varphi$, falls sie negativ unendlich wird, $f < \varphi$ sein. Für dieses Grössensystem gelten die allgemeinen und die beiden besonderen *du Bois'schen* Sätze. Die Grössenbeziehung zweier \mathbb{U} hängt aber von der benutzten Funktion $F(x)$ ab und kann für verschiedene Funktionen verschieden ausfallen, woraus noch folgt, dass im System von *du Bois's* Unendlich, falls $f \sim \varphi$ ist, keineswegs $F(f) \sim F(\varphi)$ sein muss.

*J. Thomae*¹⁰²⁾ hat zuerst versucht, die \mathbb{U} als „Zahlen“ aus unendlich vielen Einheiten zu betrachten („Ordnungsmasszahlen“). Werden die \mathbb{U} von $E_n(x)$, x , $L_n(x)$ durch η_n , 1, λ_n bezeichnet, so kann das Unendlich der Funktionsklasse, die durch

$$E_n(x)^{a_n} \dots E_1(x)^{a_1} x^a L_1(x)^{a'} \dots L_v(x)^{a^{(v)}}$$

gegeben ist, durch

$$a_n \eta_n + \dots + a_1 \eta_1 + a + a' \lambda_1 + \dots + a^{(v)} \lambda_v$$

dargestellt werden, wo die Grössenbestimmung sich durch die Beziehung $\eta_n > m \eta_{n-1}$, $\lambda_v > m \lambda_{n+1}$ ausdrückt, für m als ganze Zahl¹⁰³⁾.

99) Funktionenlehre p. 282.

100) Es giebt monoton ins unbegrenzte wachsende Funktionen, deren Quotient für $\lim x = +\infty$ unbestimmt wird; vgl. *Stolz* in Math. Ann. 14 (1878), p. 232.

101) Bologna Mem. (4) 5 (1885), p. 739.

102) Elementare Functionentheorie, Halle 1880, § 143.

103) Die Bezeichnung der Einheiten η und λ als „actual unendlich grosser

Umfassender ist das Funktionssystem, dessen \mathfrak{U} *Pincherle* (a. a. O.) durch Zahlsymbole mit unendlich vielen Einheiten darstellt; ihre Reihe ist analog zu den Ordnungszahlen von $Z(\aleph_0)$. Er zeigt zugleich, dass es unmöglich ist, die \mathfrak{U} aller Funktionen durch Zahlsymbole dieser Art auszudrücken.

18. Das Axiom des Archimedes und die Stetigkeit. *G. Veronese*¹⁰⁴⁾ hat zuerst bemerkt, dass die *Dedekind'sche* Definition der Stetigkeit¹⁰⁵⁾, nach der jede Zweiteilung der Klasse II der rationalen Zahlen eine und nur eine Zahl definiert, das Axiom des *Archimedes* einschliesst und dass das so konstruierte arithmetische Continuum nicht die allgemeinste Erweiterung Γ von II darstellt. Man gelangt zu ihr dann und nur dann, wenn für jede *Dedekind'sche* Teilung des erweiterten Grössengebiets Γ in zwei Klassen von Grössen p_2 resp. p_1 die Differenzen $p_2 - p_1$ kleiner als jede Grösse von Γ werden, so dass diese Bedingung mit dem Axiom des *Archimedes* gleichwertig ist. Verlangt man jedoch nur, dass für das erweiterte System die Differenz $p_2 - p_1$ kleiner als jede Grösse des zu Grunde gelegten Systems II wird, so kann man Grössenklassen konstruieren, die dem Axiom des *Archimedes* nicht gehorchen und bei denen nicht mehr jeder Teilung eine Grösse entspricht, sondern sogar *unendlich viele* (Nr. 19).

Auf diesen allgemeinen Grössenbegriff hat *P. Veronese* die Konstruktion des (*absoluten*) Continuum aufgebaut¹⁰⁶⁾. *Veronese's* Versuch, die Individuen dieses Continuum („transfinite Zahlen“) als Grundelemente der projektiven Geometrie zu benutzen, ist von *Schönflies* bestritten worden¹⁰⁷⁾.

resp. kleiner Zahlen“ hat eine lebhaftete Polemik über die Existenz ihnen entsprechender linearer Segmente hervorgerufen, an der besonders *Cantor*, *Peano*, *Veronese* und *Vivanti* teilgenommen haben und die meist in den ersten Bänden von *Peano's Rivista* erschienen ist. Vgl. auch den Anhang zu *Veronese's* *Fondamenti*, sowie *Zeitschr. f. Philos.* 91 u. 92.

104) *Linc. Mem.* (4) 6 (1890), p. 603. Vgl. hierzu auch *Stolz*, *Math. Ann.* 39 (1891), p. 107.

105) *Stetigkeit und irrationale Zahlen*, Braunschw. 1872, p. 21. Vgl. I A 3.

106) *Fondamenti di geometria* p. 165; vgl. auch Anmerkung 109.

107) Vgl. über diese Polemik *Jahresber. d. deutsch. Math.-Ver.* 5 (1896), p. 75, sowie *Linc. Rend.* (5) 6 (1897), p. 161 u. 362; 7 (1898), p. 79.

Für Grössen, bei denen die Zahl der Einheiten unendlich von der Mächtigkeit \aleph_0 ist und die entweder eine höchste oder tiefste Einheit besitzen, hat *T. Levi-Civita* ausser Addition und Subtraktion auch Multiplikation und Division in Übereinstimmung mit den Rechnungsgesetzen formal definiert (vgl. *Atti Ist. Ven.* [7], 4 (1893), p. 1765, sowie eine Erweiterung in *Linc. Rend.* (5) 7 (1898), p. 91).

19. Die allgemeinsten Grössenklassen. Eine allgemeine Untersuchung der bezüglichen Grössenklassen stammt von *Bettazzi*¹⁰⁸), insbesondere derjenigen, die aus lauter positiven Grössen bestehen. Die Elemente seiner Klassen genügen ausser dem allgemeinen Grössencharakter (Nr. 4) der Forderung, dass neben A und B stets auch $A + B$ und, falls $A > B$, auch $A - B$ definiert werden kann und in der Klasse vorhanden ist. Er teilt die Grössenklassen zunächst in begrenzte resp. unbegrenzte, je nachdem in ihnen eine von 0 verschiedene Minimalgrösse M existiert oder nicht. Die Anwendung der *Dedekindschen* Zweiteilung in zwei Gruppen P_1 und P_2 führt *Bettazzi* zu folgenden Formulierungen. Ergiebt die Teilung für P_2 ein Minimum und für P_1 ein Maximum, so liegt an der Teilungsstelle eine *Folge* vor. Führt jede Teilung zu einer Folge, so ist die Klasse begrenzt und besteht, falls M ihr Minimum ist, aus den sämtlichen Vielfachen von M . Hat P_2 ein Minimum und P_1 kein Maximum oder umgekehrt, so liegt eine *Bindung* vor und die Klasse ist notwendig unbegrenzt. Hat endlich weder P_2 ein Minimum, noch P_1 ein Maximum, so ist zu unterscheiden, ob die Differenz $p_2 - p_1$ kleiner als jede Grösse der Klasse wird oder nicht. Im ersten Fall liegt ein *Schnitt*, im zweiten ein *Sprung* vor. Alsdann kann die Klasse sowohl begrenzt als unbegrenzt sein.

Über das Verhältnis einer Klasse Γ zu jeder ihrer unbegrenzten Unterklassen Π bestehen folgende Sätze. Ist die Klasse Γ begrenzt, so enthält sie unendlich viele Sprünge und es entspricht einem Schnitt von Π entweder *keine* Grösse von Γ , die ihn ausfüllt, oder *unendlich viele*. Ferner enthält jede Unterklasse Π von Γ , die selbst unbegrenzt ist, Grössen, kleiner als jede Grösse von Γ selbst. Ist jedoch Γ selbst unbegrenzt, so kann einem Schnitt von Π entweder *keine* Grösse von Γ oder *eine* oder *unendlich viele* entsprechen. Im letzten Fall enthält Γ ebenfalls unendlich viele Sprünge.

Bettazzi nennt eine Klasse, in der jede Zweiteilung einen Schnitt

Sein Verfahren kommt darauf hinaus, die Grössen als Potenzreihen aufzufassen, deren Convergenz nicht in Frage steht. Ebenso muss man, wenn für *Veronese's* Transfiniten die Rechnungsoperationen gelten sollen, Zahlen zulassen der Form

$$a_0 + \frac{a_1}{\eta_1} + \frac{a_2}{\eta_2} + \dots,$$

wo die η_i die Bedeutung von Nr. 17 haben, aber die a_n über alle Grenzen wachsen, und die Zahlen einzig auf Grund der vorstehenden *formalen* Definition existieren.

108) *Teoria delle grandezze*, Pisa 1891 (sowie *Univ. Toscane* 19), insbesondere § 37 ff.

oder eine Bindung liefert, zusammenhängend. Diese Klassen genügen dem Axiom des *Archimedes*. Wenn es für jede Zweiteilung von I oder einer ihrer Unterklassen II , die einen Schnitt verursacht, eine ihn ausfüllende Grösse giebt, so heisst die Klasse geschlossen; sie kann also, falls sie nur geschlossen ist, noch Sprünge enthalten¹⁰⁹⁾. Auf Grund hiervon definiert *Bettazzi* das Continuum als Grössenklasse, die geschlossen und zusammenhängend ist und damit Zahlencharakter besitzt.

109) Von *Veronese* (a. a. O.) und *Stolz* werden auch diese Klassen im allgemeinen Sinn stetig genannt (Math. Ann. 39, p. 107). Dieser Art ist z. B. *Veronese's* absolutes Continuum (Nr. 18).

I A 6. ENDLICHE DISCRETE GRUPPEN

VON

HEINRICH BURKHARDT

IN ZÜRICH.

Inhaltsübersicht.

1. Permutationen und Substitutionen.
 2. Ordnung einer Substitution.
 3. Cykeln.
 4. Analytische Darstellung von Substitutionen.
 5. Substitutionsgruppen.
 6. Transitivität, Primitivität.
 7. Symmetrische und alternierende Gruppe.
 8. Mögliche Ordnungszahlen von Gruppen.
 9. Mehrfach transitive Gruppen.
 10. Lineare homogene Gruppe.
 11. Gruppe der Modulargleichung.
 12. Andere Untergruppen der linearen homogenen Gruppe.
 13. Aufzählungen von Gruppen der niedrigsten Grade.
 14. Isomorphismus.
 15. Allgemeiner Gruppenbegriff.
 16. Normalteiler.
 17. Kompositionsreihe.
 18. Isomorphismen einer Gruppe mit sich selbst.
 19. Erzeugende Operationen; geometrische Bilder von Gruppen.
 20. Abel'sche Gruppen.
 21. Die Sylow'schen Sätze.
 22. Einfache Gruppen.
 23. Auflösbare Gruppen.
 24. Gruppendeterminante.
-

Lehrbücher.

- C. Jordan*, Traité des substitutions et des équations algébriques, Paris 1870.
E. Netto, Substitutionentheorie und ihre Anwendung auf die Algebra, Leipzig 1882; ital. von *G. Battaglini*, Torino 1885; engl. von *F. N. Cole*, Ann Arbor 1892.
H. Vogt, Leçons sur la résolution algébrique des équations, Paris 1895.

W. Burnside, Theory of groups of finite order, Cambridge 1897.

L. Bianchi, Teoria dei gruppi di sostituzioni e delle equazioni algebriche, Pisa 1897 (lit.).

Übrigens vergleiche man auch die einschlägigen Kapitel in den Lehrbüchern der Algebra von Borel et Drach, Capelli e Barbieri, Chrystal, Comberousse, Petersen, Pincherle, Serret (Bd. 2, 4. Buch; seit der 3. Aufl., 1866), Weber (Bd. 1, 3; Bd. 2, 1—3).

1. Permutationen und Substitutionen. Bereits im vorigen Jahrhundert hatte sich die Aufmerksamkeit der Mathematiker wiederholt auf die Gesamtheit derjenigen Vertauschungen von n Grössen gelenkt, bei welchen eine rationale Funktion von ihnen ihren Wert nicht ändert; bei P. Ruffini¹⁾ finden sich schon eine ziemliche Anzahl von Sätzen darüber. Seine Resultate sind dann von A. Cauchy²⁾ geordnet und ergänzt worden.

Seien die zu vertauschenden Grössen einfach mit

$$1, 2, 3, \dots n$$

bezeichnet; irgend eine andere Anordnung³⁾ von ihnen mit

$$a_1, a_2, \dots a_n.$$

Der Übergang von der ersten Anordnung zur zweiten heisst *Substitution*⁴⁾ und wird mit⁵⁾:

$$\begin{pmatrix} 1, 2, 3, \dots n \\ a_1, a_2, a_3, \dots, a_n \end{pmatrix}$$

bezeichnet, in geeigneten Fällen auch durch einen einzelnen Buchstaben⁶⁾. Dieselbe Substitution auf eine andere Anordnung $b_1, b_2, \dots b_n$ ausüben heisst: diese Anordnung durch

$$a_{(b_1)}, a_{(b_2)}, \dots a_{(b_n)}$$

ersetzen. Dadurch ist auch die Bedeutung des Ausdrucks definiert: „man übe auf eine Anordnung A erst die Substitution S und dann

1) Vgl. H. Burkhardt, Abh. z. Gesch. d. M. 6, 1892, p. 119 = Ann. di mat.

(2) 22, 1894, p. 175.

2) J. éc. polyt. cah. 17, 1815, p. 1; exerc. d'analyse et de phys. math. 3, Paris 1844 [45/46]; Par. C. R. 21, 1845; 22, 1846.

3) „arrangement“ bei Cauchy, exerc. d'anal. 3, p. 151. — Sonst wird „permutation“ in diesem Sinne gebraucht, so bei Cauchy, J. éc. polyt. cah. 17, p. 3; E. Galois, oeuvr. p. 35 (J. de math. [1] 11, 1846 [31]). Vgl. I A 2, 2.

4) Cauchy, J. éc. polyt. cah. 17, p. 4; später (exerc. d'anal. 3, p. 152; Par. C. R. 21, p. 594) gebraucht er permutation als Synonym von substitution. Seitdem schwankt der Sprachgebrauch.

5) Cauchy, J. éc. polyt. cah. 17, p. 10; in den exerc. d'anal. und in den C. R. setzt er die erste Anordnung in die untere Zeile.

6) Cauchy, J. éc. polyt. cah. 17, p. 4.

auf die resultierende Anordnung B die Substitution T aus“; man erhält eine Anordnung C ,⁷⁾ die aus A auch direkt durch eine bestimmte Substitution U erhalten wird. Die damit gegebene Beziehung zwischen S, T, U ist von A unabhängig; sie wird durch die Gleichung:

$$ST = U$$

ausgedrückt⁸⁾. Man nennt U das *Produkt*⁹⁾ von S und T ; diese Produktbildung ist associativ, aber im allgemeinen nicht commutativ. Ist $ST = TS$, so heissen S und T *vertauschbar*¹⁰⁾.

Diejenige Substitution, welche kein Element versetzt, heisst die *identische*¹¹⁾ und wird mit 1 bezeichnet¹²⁾.

2. Ordnung einer Substitution. Für SS schreibt man S^2 , für SSS : S^3 u. s. f.¹³⁾. Es giebt Zahlen n , für welche $S^n = 1$ ist; die kleinste ν unter ihnen heisst die *Ordnung*¹⁴⁾ von S . Sind k, l beliebige ganze Zahlen, so ist $S^{k\nu+l} = S^l$; für nicht positive Werte von l ist das Zeichen S^l durch diese Gleichung definiert¹⁵⁾. S^{-1} heisst die zu S *inverse* Substitution¹⁶⁾.

3. Cykeln. Eine Substitution der Form:

$$\begin{pmatrix} x & y & z & \dots & v & w \\ y & z & u & \dots & w & x \end{pmatrix}$$

heisst *cyklisch*¹⁷⁾ und wird kürzer mit $(xyz \dots vw)$ bezeichnet¹⁸⁾. Jede Substitution kann als Produkt cyklischer Substitutionen ohne gemeinsame Elemente dargestellt werden¹⁹⁾; ihre Ordnung ist dann das

7) *H. Wiener* (Lpz. Ber. 1889, p. 249) schreibt solche Beziehungen:

$$A \{S\} B \{T\} C.$$

8) *Cauchy*, J. éc. polyt. cah. 17, 1815, p. 10 (noch ohne die Bezeichnung der Subst. durch einzelne Buchstaben); ebenso *Jordan*, *Netto*, *Weber*, *Burnside*. Dagegen in den exerc. d'anal. die umgekehrte Schreibweise, ebenso bei *Serret*. Für die analytische Darstellung (Nr. 4) ist das letztere bequemer.

9) *Cauchy*, J. éc. polyt. cah. 17, p. 10.

10) *permutable* bei *Cauchy*, exerc. d'anal. t. 3, 1844, p. 154; *échangeable* bei *C. Jordan*, J. de math. (2) 12, 1867, p. 117. — Ist $ST = TSF$, so heisst F der *Commutator* von A und B (*R. Dedekind* bei *G. Frobenius*, Berl. Ber. 1896, p. 1348).

11) *Cauchy*, J. éc. polyt. cah. 17, p. 10.

12) *Cauchy*, exerc. d'anal. 3, p. 155.

13) *Cauchy*, J. éc. polyt. cah. 17, p. 11.

14) *Cauchy*, ib. p. 13 degré; *N. H. Abel*, oeuvr. t. 1, p. 76 (J. f. Math. 1, 1826) ordre; *Cauchy*, exerc. d'anal. 3, p. 157; Par. C. R. 21, p. 599 degré ou ordre.

15) *Cauchy*, exerc. d'anal. 3, p. 164; Par. C. R. 21, p. 780.

16) ib. p. 163; Par. C. R. 21, p. 780.

17) *circulaire* bei *Cauchy*, J. éc. polyt. cah. 17, p. 17.

18) *Cauchy*, Par. C. R. 21, p. 600; exerc. d'anal. 3, p. 157.

19) Par. C. R. 21, p. 601; exerc. d'anal. 3, p. 159.

kleinste gemeinschaftliche Vielfache der Ordnungen ihrer Cykeln²⁰⁾. Haben alle Cykeln gleiche Ordnungszahl, so heisst die Substitution *regulär*²¹⁾. Zwei Substitutionen P, Q , die dieselbe Anzahl von Cykeln und in entsprechenden Cykeln gleich viele Elemente enthalten, heissen zu einander *ähnlich*²²⁾; es giebt dann²³⁾ eine Substitution R von der Art, dass $Q = R^{-1}PR$ ist. Man sagt: Q entsteht aus P durch Transformation mittelst R .²⁴⁾

4. Analytische Darstellung von Substitutionen. Ist die Anzahl n der Elemente eine Primzahl p , so kann man sie mit α_z ($z = 1, 2, \dots p$) bezeichnen und dann jede Substitution durch eine Congruenz der Form $z \equiv \varphi(z) \pmod{p}$ darstellen, wo φ eine ganze Function ($n - 2$)^{ten} Grades vorstellt, die (für $n > 2$) noch gewissen Bedingungen zu genügen hat²⁵⁾. Ist n Primzahlpotenz p^z , so kann man die p^z reellen und imaginären Wurzeln der Congruenz $x^n \equiv x \pmod{n}$ zu Indices nehmen²⁶⁾ oder jedes Element durch einen Buchstaben mit α reellen, mod. p zu nehmenden Indices bezeichnen²⁷⁾.

5. Substitutionsgruppen. Hat eine Gesamtheit von Substitutionen die Eigenschaft, dass jedes Produkt von irgend zweien derselben selbst in ihr enthalten ist, so heisst sie eine *Gruppe*²⁸⁾. Die Anzahl

20) Par. C. R. 21, p. 601; exerc. d'anal. 3, (1845), p. 162.

21) Par. C. R. 21, p. 835; exerc. d'anal. 3, p. 202.

22) Par. C. R. 21, p. 840; exerc. d'anal. 3, p. 165.

23) Par. C. R. 21, p. 841; exerc. d'anal. 3, p. 168. Q entsteht dadurch, dass man R in den Cykeln von P ausführt.

24) derivata bei *E. Betti*, Ann. fis. mat. 3, 1852, p. 55; transformée bei *C. Jordan*, J. de math. (2) 12, 1867, p. 110.

25) *Ch. Hermite* bei *A. Cauchy*, Par. C. R. 21, 1845, p. 1247; *E. Betti*, Ann. fis. mat. 2, 1851, p. 17; *Ch. Hermite*, Par. C. R. 57, 1863, p. 750; *Fr. Brioschi*, Lomb. Rend. (2) 12, 1879, p. 483; *A. Grandi*, Linc. Rend. (2) 16, 1883, p. 101; *Fr. Rinecker*, Diss. Erl. 1886; *L. J. Rogers*, Lond. Math. Proc. 22, p. 37 und Mess. (2) 21, p. 44, 1891; *L. E. Dickson*, Am. J. 13, 1896, p. 210.

26) *E. Galois*, oeuvr. p. 21 (Bull. Fér. 13, 1830).

27) *E. Galois*, oeuvr. p. 27 (revue encyclop., sept. 1832); p. 53 (J. de math. 11, 1846 [31]).

28) Dass die Gesamtheit der Vertauschungen, bei denen eine rationale Function von n Veränderlichen ihren Wert nicht ändert, die genannte Eigenschaft hat, hat *P. Ruffini* bemerkt (teoria delle equazioni, Bol. 1799, Bd. 2, cap. 13); er nennt die Gesamtheit eine Permutation. *E. Galois* oeuvr. p. 25 (rev. enc. 1832); p. 35 (J. de math. 15, 1846 [31]) definiert: eine Gesamtheit von Permutationen (d. h. arrangements) heisst dann eine Gruppe, wenn jede Substitution, die eine Permutation der Gesamtheit in eine andere der Gesamtheit überführt, jede Permutation der Gesamtheit in eine andere der Gesamtheit überführt (Erläuterungen zu *Galois* haben *E. Betti*, Ann. fis. mat. 2—6, 1851—55, *Th. Schönemann* (auf Veranlassung von *C. G. J. Jacobi*), Wien. Denkschr. 52, 1853, p. 143, *J. A. Serret* in seinem Lehrbuch seit 1866, *C. Jordan*, Par. C. R. 60, 1865, p. 770,

N der Substitutionen, die sie enthält, heisst ihre *Ordnung*²⁹⁾; der Quotient $n!/N$, der stets eine ganze Zahl ist³⁰⁾, ihr *Index*³¹⁾, die Anzahl der Buchstaben, auf die sie sich bezieht, ihr *Grad*³²⁾. Gehören alle Substitutionen einer Gruppe g zugleich einer andern Gruppe G an, so heisst g *Teiler*³³⁾ oder *Untergruppe*³⁴⁾ von G . Die Ordnung von g ist dann ein Teiler der Ordnung von G ³⁵⁾, der Quotient beider Ordnungszahlen *Index* von g innerhalb G .³⁶⁾

6. Transitivität, Primitivität. Gestatten die Substitutionen einer Gruppe, jedes Element an jede Stelle zu bringen, so heisst sie *transitiv*³⁷⁾, sonst *intransitiv*³⁸⁾. Lassen sich die Elemente in Systeme von gleich vielen so einteilen, dass die Elemente jedes Systems bei allen Substitutionen der Gruppe immer wieder nur durch Elemente eines Systems ersetzt werden, so heisst sie *imprimitiv*³⁹⁾, sonst *primitiv*⁴⁰⁾.

Math. Ann. 1, 1869, p. 141, J. König, ib. 14, 1879 [78], p. 212, P. Bachmann, ib. 18, 1881, p. 449 gegeben). A. Cauchy sagte: *System conjuguierter Substitutionen* (Par. C. R. 21, 1845, p. 605; exerc. d'anal. 3, p. 183); ebenso Serret. Die Ausdrucksweise des Textes hat C. Jordan eingeführt J. de math. (2) 12, 1867, p. 109; daneben gebraucht er auch *faisceau* (traité p. 22).

29) *diviseur indicatif* bei A. Cauchy, J. éc. polyt. cah. 17, 1815, p. 7; *grado* bei E. Betti, ann. fis. mat. 3, 1852, p. 59; *ordre* bei A. Cauchy, Par. C. R. 21, 1845, p. 605 und exerc. d'anal. 3, p. 183; *grado di uguaglianza* (der entspr. Funktion) bei P. Ruffini a. a. O.

30) Den entsprechenden Satz für die zu der Gruppe gehörenden rationalen Funktionen von n Veränderlichen hat J. Lagrange, oeuvr. 3, p. 373 (Berl. Mém. 1771 [73]) ausgesprochen und P. Abbatì, soc. It. mem. 10, II, 1803 [1802], p. 38 bewiesen.

31) A. Cauchy, J. éc. polyt. cah. 17, p. 6.

32) C. Jordan, Math. Ann. 1, 1869, p. 141.

33) E. Galois, oeuvr. p. 58 (J. de math. 11, 1846 [31]); G. Frobenius und L. Stickelberger, J. f. Math. 86, 1879 [78], p. 220.

34) S. Lie, Gött. Nachr. 1874, p. 536.

35) J. A. Serret, cours art. 424; ein specieller Fall bei A. Cauchy, exerc. d'anal. 3, p. 185.

36) F. Klein u. R. Fricke, Modulfunktionen 1, Leipz. 1890, p. 310. R. Dedekind (Dirichlets Zahlentheorie, 4. Aufl., Braunschw. 1894, p. 475) bezeichnet diesen Quotienten mit (G, g) .

37) A. Cauchy, Par. C. R. 21, 1845, p. 669.

38) Bei P. Ruffini: *permutazione composta di prima specie*.

39) *permutazione composta di 2ª sp.* bei P. Ruffini; *fonction transitive complexe* bei A. Cauchy, Par. C. R. 21, 1845, p. 731; *gruppo a lettere congiunte* bei E. Betti, ann. fis. mat. 3, 1852; *gruppo complesso* bei dems. 6, 1855, p. 8; *grouped group* bei T. P. Kirkman, Manch. Mem. (3) 1, 1862 [61], p. 305; *système secondaire* bei C. Jordan, J. éc. polyt. cah. 38, 1861, p. 190. — Das Wort *imprimitiv* scheint nicht vor E. Netto, Subst.-Theorie p. 77 vorzukommen. Einen von C. Jordan, traité p. 34 aufgestellten Satz über „Faktoren der Imprimitivität“ hat er Giorn. di mat. 10, 1872, p. 116 selbst berichtigt.

40) *permutazione composta di 3ª sp.* bei P. Ruffini; *groupe primitif* bei E. Ga-

7. Symmetrische und alternierende Gruppe. Die Gesamtheit aller $n!$ Substitutionen von n Elementen bildet die *symmetrische Gruppe*⁴¹⁾. — Eine Substitution, die nur zwei Elemente untereinander vertauscht, heisst eine *Transposition*⁴²⁾. Jede Substitution lässt sich auf verschiedene Arten als Produkt von Transpositionen darstellen, die Anzahl derselben ist aber dabei entweder stets gerade oder stets ungerade; darnach werden die Substitutionen selbst als *gerade* und *ungerade* unterschieden⁴³⁾. Die ersteren bilden die *alternierende Gruppe*⁴⁴⁾; ihre Ordnung ist $\frac{1}{2}n!$

8. Mögliche Ordnungszahlen von Gruppen. Nicht jeder Teiler von $n!$ kann Ordnungszahl einer Gruppe des Grades n sein. So giebt es für $n > 4$ keine Gruppe, deren Index zugleich > 2 und $< n$ wäre⁴⁵⁾. Auch giebt es keine andere Gruppe vom Index 2, als die alternierende⁴⁶⁾, und, ausser für $n = 6$, keine anderen Gruppen vom Index n , als diejenigen, die ein Element fest lassen⁴⁷⁾. Ist der Index $> n$, und $n > 6$, so ist er⁴⁸⁾ mindestens $= 2n$; ist er grösser als $2n$, so

lois, oeuvr. p. 58 (J. de Math. 15, 1846 [31]); *équation primitive* schon p. 11 (Bull. Fér. 13, 1830).

41) *E. Netto*, Substitutionentheorie p. 33.

42) *Cauchy*, J. éc. polyt. cah. 17, p. 18.

43) Vgl. den Abschnitt I A 2, Nr. 3.

44) *groupe alterné* bei *C. Jordan*, traité p. 63.

45) *P. Ruffini* hatte bewiesen, dass es für $n = 5$ keine Gruppe giebt, deren Index zugleich > 2 und < 5 wäre (teoria delle equazioni, Bol. 1799, cap. 13); vereinfacht und auf $n > 5$ erweitert von *P. Abbati*, soc. It. mem. 10, 1803 [02]. *A. Cauchy* zeigte, dass es für $n > 5$ keine Gruppe giebt, deren Index zugleich > 2 und kleiner als die grösste Primzahl p wäre, die nicht $> n$ ist (J. éc. polyt. cah. 17, 1815, p. 9); auch für $n = 6$ keine vom Index 5 (ib. p. 20). Der Satz des Textes ist zuerst von *J. Bertrand* mittelst eines zahlentheoretischen Postulats bewiesen, J. éc. polyt. cah. 30, 1845, p. 123 (eine Ergänzung bei *J. A. Serret*, J. de math. 14, 1849, p. 135); ohne ein solches von *A. Cauchy*, Par. C. R. 21, 1845, p. 1101; *J. A. Serret*, J. éc. polyt. cah. 32, 1848, p. 147; aus der Einfachheit (Nr. 16) der alternierenden Gruppe von *J. König*, Math. Ann. 14, 1879 [1878], p. 215 und *L. Kronecker*, Berl. Ber. 1879, p. 211.

46) Für $n = 6$ *Cauchy*, J. éc. polyt. cah. 17, p. 26; allgemein (bezw. der entsprechende Satz für rationale Funktionen) *N. H. Abel*, oeuvr. 1, p. 80 (J. f. Math. 1, 1826).

47) Für $n = 5$ *N. H. Abel*, oeuvr. 1, p. 31 (1824, ohne Beweis) und p. 83 (J. f. Math. 1, 1826); allgemein auf Grund seines Postulats *J. Bertrand*, J. éc. polyt. cah. 30, 1845, p. 133; ohne ein solches *J. A. Serret*, J. de math. 15, 1850, p. 20. 23. — Die Ausnahme für $n = 6$ *Ch. Hermite* bei *Cauchy*, Par. C. R. 21, 1845, p. 1201; 22, 1846, p. 31.

48) *J. Bertrand*, J. éc. polyt. cah. 30, 1845, p. 133 (für $n > 9$); *A. Cauchy*, Par. C. R. 21, 1845, p. 1101 (ohne Bew.); *J. A. Serret*, J. de math. 15, 1850, p. 36 für $n > 8$; *E. Mathieu*, Par. thèse 1859, p. 4 für $n > 6$ (ohne Beweis).

ist er⁴⁹) mindestens $= \frac{1}{2}n(n-1)$; ist er noch grösser und $n > 8$, so ist er⁵⁰) mindestens $= n(n-1)$.

9. Mehrfach transitive Gruppen. Eine Gruppe heisst *k-fach transitiv*, wenn ihre Substitutionen *k* beliebige Elemente an *k* beliebige Stellen zu bringen gestatten⁵¹). Eine Gruppe heisst *von der Klasse c*, wenn keine ihrer Substitutionen, ausser 1, weniger als *c* Buchstaben versetzt⁵²). Zwischen Grad, Transitivitätszahl und Klasse einer primitiven Gruppe bestehen gewisse Ungleichungen⁵³).

10. Lineare homogene Gruppe. Die Potenzen einer Substitution bilden eine *cyklische Gruppe*⁵⁴). Ist die Ordnung der Substitution gleich der Anzahl der Elemente, so lassen sich die Substitutionen einer solchen Gruppe darstellen durch⁵⁵):

$$z' \equiv z + c \pmod{n}$$

(vgl. Nr. 4). Ebenso bilden die durch:

$$z'_1 \equiv z_1 + c_1, \quad z'_2 \equiv z_2 + c_2, \quad \dots \quad z'_x \equiv z_x + c_x \pmod{p}$$

dargestellten Substitutionen der p^x Elemente $a_{z_1 z_2 \dots z_x}$ eine Gruppe⁵⁶) der Ordnung p^x . Ferner bilden die durch:

49) *A. Cauchy*, Par. C. R. 21, p. 1101 (ohne Bew.); *J. A. Serret*, Par. C. R. 29, 1849, p. 11; *J. de math.* 15, 1850, p. 43.

50) *E. Mathieu*, Par. C. R. 46, 1858, p. 1048; Par. thèse 1859, p. 4 (ohne Beweis).

Weitere Sätze über mögliche Ordnungszahlen transitiver Gruppen geben *C. Jordan*, Par. C. R. 66, 1868, p. 836; 76, 1873, p. 953; *J. de math.* (2) 14, 1869, p. 146; 16, 1871, p. 383; 17, 1872, p. 351; traité p. 76, 664; *L. Sylow*, Math. Ann. 5, 1872, p. 592; Acta math. 11, 1888, p. 256; *E. Netto*, J. f. Math. 83, 1877 [76] p. 43; 85, 1878, p. 327; 102, 1888 [87], p. 322; *G. Frobenius*, J. f. Math. 101, 1887 [86], p. 290; *A. Bochert*, Math. Ann. 33, 1889 [88], p. 584; 40, 1892, p. 57; 49, 1897, p. 112; *E. Maillet*, Par. C. R. 119, 1894, p. 362; *G. A. Miller*, N. Y. Bull. (2) 4, 1897, p. 144.

51) *E. Mathieu*, Par. thèse 1859, p. 16.

52) *C. Jordan*, Par. C. R. 72, 1871, p. 854; 73, 1871, p. 853.

53) *C. Jordan*, J. de math. (2), 16, 1871, p. 383; 17, 1872, p. 351; (5) 1, 1895, p. 35; Bull. soc. math. 1, 1873, p. 175; Par. C. R. 76, 1873, p. 952; 78, 1874, p. 1217; J. f. Math., 79, 1874, p. 248; *A. Bochert*, Diss. Breslau 1877; Math. Ann. 29, 1887 [86], p. 27; 33, 1889, p. 572; 40, 1892 [91], p. 176; 49, 1897 [96] p. 133; *E. Netto*, J. f. Math. 85, 1878, p. 334; *F. Rudio*, J. f. Math. 102, 1887, p. 1; *B. Marggraff*, Diss. Giessen 1889; Progr. Soph. Gymn. Berlin 1895; *E. Maillet*, Toul. Ann. 9, 1895, p. D 9. — Fünffach transitive Gruppen für $n = 12$ und $n = 24$ hat *E. Mathieu* angegeben, J. de math. (2) 6, 1861, p. 270; 18, 1873, p. 25; dazu *C. Jordan*, Par. C. R. 79, 1874, p. 1149.

54) *permutazione semplice* bei *P. Ruffini*.

55) *E. Galois*, oeuvr. p. 22 (Bull. Fér. 13, 1830), p. 47 (J. de math. 11, 1846 [31]); *A. Cauchy*, exerc. d'anal. 3, 1844 [45], p. 232 (arithmetische Substitutionen).

56) *E. Galois*, oeuvr. p. 54 (J. de math. 11, 1846 [31]).

$$\begin{aligned} z_1' &\equiv c_{11}z_1 + c_{12}z_2 + \cdots + c_{1\kappa}z_\kappa \\ z_2' &\equiv c_{21}z_1 + c_{22}z_2 + \cdots + c_{2\kappa}z_\kappa \\ &\vdots \\ z_\kappa' &\equiv c_{\kappa 1}z_1 + c_{\kappa 2}z_2 + \cdots + c_{\kappa \kappa}z_\kappa \end{aligned} \pmod{p}$$

dargestellten Substitutionen, deren Determinante von 0 verschieden ist, eine Gruppe, die *lineare* (homogene) Gruppe⁵⁷⁾; ihre Ordnung ist⁵⁸⁾, wenn p Primzahl:

$$(p^\kappa - 1)(p^\kappa - p) \cdots (p^\kappa - p^{\kappa-1});$$

diejenigen von ihnen, deren Determinante $\equiv 1 \pmod{p}$ ist, eine Untergruppe derselben⁵⁹⁾.

11. Gruppe der Modulargleichung. Die lineare homogene Gruppe lässt das Element $a_{00} \dots 0$ unversetzt und zerlegt die $p^\kappa - 1$ übrigen in Systeme der Imprimitivität von je $p - 1$, die in den Werten der Verhältnisse $z_1 : z_2 : \dots : z_\kappa$ übereinstimmen⁶⁰⁾. Für $\kappa = 2$ sind die $p + 1$ Systeme durch je einen Index $z_1 : z_2 = z$ zu bezeichnen, der mod p die Werte $0, 1, 2, \dots, p - 1, \infty$ annimmt; die Gruppe der Systeme ist dann⁶¹⁾:

$$z' \equiv \frac{\alpha z + \beta}{\gamma z + \delta} \pmod{p}.$$

Diejenigen von diesen Substitutionen, für die $\alpha\delta - \beta\gamma$ quadratischer Rest ist, bilden die „Gruppe der Modulargleichung“ (vgl. II B 6 b)⁶²⁾.

57) *E. Galois*, *oeuvre*. p. 27 (*revue encyclopéd.*, sept. 1832), p. 47 ($\kappa = 1$), 53 ($\kappa = 2$) (*J. de math.* 11, 1846 [31]). Für $\kappa = 1$ auch *A. Cauchy* a. zuletzt a. O. (geometrische Substitutionen). *L. Kronecker*, *Berl. Ber.* 1879, p. 217 nennt die lineare Gruppe für die zu $\kappa = 1$ gehörenden Funktionen „*metacyklisch*“. — Ausführlich behandelt von *C. Jordan*, *traité* p. 91–249. — Ursprünglich hatte *Galois* imaginäre Indices (vgl. Nr. 4, Note 3) eingeführt und Substitutionen betrachtet, die sich durch lineare Funktionen von diesen ausdrücken; vgl. dazu *E. Betti*, *Ann. fis. mat.* 3, 1852, p. 52; *E. Mathieu*, *Par. C. R.* 48, 1859, p. 841; *J. de math.* (2) 5, 1860, p. 38; 6, 1861, p. 261; *Ann. di mat.* 4, 1861, p. 113; *W. Burnside*, *Lond. M. Proc.* 25, 1894, p. 113; *E. H. Moore*, *Chicago congress papers*, 1896 [98] p. 208.

58) Satz bei *E. Galois*, *oeuvre*. p. 27 (*rev. enc.*, sept. 1832); Bew. bei *E. Betti*, *Ann. fis. mat.* 3, 1852, p. 76. — Für nicht primzahlige Moduln *C. Jordan*, *traité* p. 96.

59) *C. Jordan*, *traité* p. 106.

60) Für $\kappa = 2$ *E. Galois*, *oeuvre*. p. 27 (*revue encyclop.* sept. 1832, aus der Theorie der elliptischen Funktionen); p. 59 (*J. de math.* 11, 1846 [31]); für beliebige κ *E. Betti*, *Ann. fis. mat.* 3, 1852, p. 74.

61) *E. Galois*, *oeuvre*. p. 27; p. 59.

62) ib. p. 28; vgl. dazu *E. Betti* a. a. O. u. 4, 1853, p. 90; *J. A. Serret*, *Par. C. R.* 48, 1859, p. 112, 178, 237; *Ch. Hermite*, ib. p. 49, p. 110; der Sache, nicht der Bezeichnung nach auch *E. Mathieu*, *Par. thèse* 1859, p. 38 und *T. P. Kirkman*, *Manch. Mem.* (3) 1, 1862 [61], p. 365; 2, 1865 [62], p. 204.

Sie besitzt für $p = 5, 7, 11$, und nur für diese Primzahlen, Untergruppen vom Index p .⁶³⁾

12. Andere Untergruppen der homogenen linearen Gruppe werden gebildet von denjenigen Substitutionen, die je eine homogene Funktion der Indices in sich transformieren⁶⁴⁾, z. B. die Summe ihrer Quadrate (orthogonale Gruppe)⁶⁵⁾ oder, für $n = 2n$, die Bilinearform

$$\sum_{m=1}^n (\xi_m \xi_{m+n} - \xi_m \xi_{m+n}),$$

in der die ξ zu den z cogrediente Grössen (II B 2) bedeuten⁶⁶⁾.

13. Aufzählungen von Gruppen der niedrigsten Grade. Alle, bezw. alle transitiven oder alle primitiven Gruppen von gegebenem Grad aufzuzählen ist vielfach unternommen worden⁶⁷⁾; fast jede der betr. Arbeiten stellt Versehen der vorhergehenden richtig.

63) *E. Galois*, oeuvr. p. 28 (rev. enc. 1832, p. 12; Bull. Fér. 1830, noch nicht richtig) ohne Beweis. Beweis der ersten Hälfte von *E. Betti*, Ann. fis. mat. 4, 1853, p. 90; von *Ch. Hermite*, J. f. Math. 40, 1850, p. 280 angekündigt, Par. C. R. 49, 1859, p. 110 ausgeführt; der zweiten Hälfte von *C. Jordan*, Par. C. R. 66, 1868, p. 308; von *L. Sylow*, Christ. Forh. 1870, p. 387; von *J. Gierster*, Diss. Leipz. = Math. Ann. 18, 1881, p. 368 auf Grund einer Aufzählung sämtlicher Untergruppen (Math. Ann. 26, 1885, p. 309 auch für eine ungerade Primzahlpotenz als Modul). Vgl. *F. Klein* u. *R. Fricke*, Modulfunktionen, Bd. 1, Leipz. 1890, p. 409—491. — Ein allgemeinerer Satz bei *L. Sylow*, Christ. Skifter 1897, no. 9.

Lineare gebrochene Substitutionen unter Galois'schen Imaginären bei *E. Mathieu*, J. de math. (2) 5, 1860, p. 38; 6, 1861, p. 261; Ann. di mat. 4, 1861, p. 113; *W. Burnside*, Lond. M. Proc. 25, 1894, p. 113; *E. H. Moore*, Chicago congress papers, 1896 [93], p. 226.

64) *C. Jordan*, traité p. 219.

65) ib. p. 155.

66) ib. p. 171; Par. C. R. 68, 1869, p. 656. Die Gruppe tritt in der Theorie der Transformation der mehrfach periodischen (Abelschen) Funktionen auf; *Jordan* nennt sie daher Abelsche Gruppe, in anderm Sinne, als 20. Zwei Untergruppen (für $p = 2$), bei denen bezw. eine gerade und eine ungerade Thetacharakteristik in sich übergeht, nennt er „hypoabéliens“ (traité p. 195). — Andere Untergruppen der linearen Gruppe traité p. 219, 319, 606.

67) Für $n = 2, 3, 4, 5, 6$ *A. Cauchy*, Par. C. R. 21, 1845, p. 1363, 1401; 22, 1846, p. 2;

$n = 7, 8$. *E. Mathieu*, ib. 46, 1859, p. 1048, 1208; *E. H. Askwith*, Qu. J. 24, 1890, p. 111, 263; *A. Cayley*, philos. mag. 18, 1859, p. 34 = coll. pp. 4, p. 88; Qu. J. 25, 1891, p. 71, 137; *F. N. Cole*, N. Y. Bull. 2, 1893, p. 184; *G. A. Miller*, ib. 3, 1894, p. 169. Vgl. auch *O. Hölder*, Math. Ann. 40, 1892, p. 83.

$n = 9$. *E. H. Askwith*, Qu. J. 26, 1892, p. 79; *F. N. Cole*, ib. p. 372; N. Y. Bull. 2, 1893, p. 250; *G. A. Miller*, ib. 3, 1894, p. 242 ($n = 8, 9$);

$n = 10$. *T. P. Kirkman*, Manch. Proc. (3) 3, 1864 [63] p. 142; 4, 1865, p. 171;

14. Isomorphismus. Zwei Gruppen G, Γ heissen *homomorph* auf einander bezogen, wenn ihre Substitutionen einander so zugeordnet sind, dass, sobald A der A und B der B entspricht, auch AB der AB entspricht⁶⁸); entsprechen dabei z. B. jeder Substitution von G 4 von Γ und jeder von Γ 2 von G , so heisst G zu Γ *ditetramorph*. Entspricht jeder von G nur eine von Γ und jeder von Γ nur eine von G , so heissen G und Γ *holoedrisch isomorph*⁶⁹).

15. Allgemeiner Gruppenbegriff. Sieht man von der Bedeutung der einzelnen Operationen ab und achtet nur auf die Gesetze der Zusammensetzung, so sind zwei isomorphe Gruppen überhaupt nicht verschieden⁷⁰). Aus dieser Auffassung hat sich die *allgemeine Definition einer Gruppe*⁷¹) entwickelt als eines Systems von Elementen (resp. von Operationen), das folgenden Bedingungen genügt:

F. N. Cole, Qu. J. 27, 1893, p. 39; *G. A. Miller*, ib. p. 99; N. Y. Bull. (2) 1, 1894, p. 67.

$n = 11$. *F. N. Cole*, ib. p. 49;

$n = 12$. *G. A. Miller*, Par. C. R. 122, 1896, p. 372; Qu. J. 28, 1896, p. 193; N. Y. Bull. (2) 1, 1895, p. 255;

$n = 13, 14$. *G. A. Miller*, Quart. J. 29, 1897, p. 224.

$n = 32$. *R. Levassieur*, Par. C. R. 122, 1896, p. 182;

$n = 8$ p. *R. Levassieur*, Par. C. R. 122, 1896, p. 516; *G. A. Miller*, ib. 123, p. 591.

Eine Aufzählung der *primitiven* Gruppen bis $n = 17$ giebt *C. Jordan*, Par. C. R. 75, 1872, p. 1754.

Eine besondere Klasse von Substitutionsgruppen sind die *Tripelgruppen*; vgl. *M. Nöther*, Math. Ann. 15, 1879, p. 87; *E. Netto*, Subst.-Theorie p. 220; Math. Ann. 42, 1893 [92], p. 143; *E. H. Moore*, ib. 43, 1893, p. 271; 50, 1898 [97], p. 225; Pal. Rend. 9, 1895, p. 86; N. Y. Bull. (2), 4, 1897, p. 11; *J. de Vries*, Pal. Rend. 8, 1894, p. 222; *G. A. Miller*, N. Y. Bull. (2) 2, p. 138; *L. Heffter*, Math. Ann. 49, 1897 [96], p. 101; *W. Burnside*, theory p. 213. Vgl. auch I A 2, 10.

68) *A. Capelli*, Giorn. di mat. 16, 1878, p. 32; der Name bei *F. Klein*, Math. Ann. 41, 1892, p. 22.

69) *C. Jordan*, traité (1870), p. 56. — Entspricht jeder Substitution von G nur eine von Γ , aber jeder von Γ mehrere von G , so nennt *C. Jordan* Γ zu G *meridrisch isomorph*; *E. Netto*, Subst.-Th. p. 97 sagt: *mehrstufig is.*, *W. Burnside*, theory p. 29: *multiply isomorphic*.

70) Vgl. *E. Galois*, oeuvr. p. 40, scolie II (J. de math. 11, 1846 [31]).

71) *A. Cayley*, coll. pp. 2, p. 123 (Phil. mag. 4, 1854); 10, p. 323 (Lond. Math. Proc. 9, 1878) (dazu vgl. man die Ausführungen von *W. Dyck*, Math. Ann. 20, 1881, p. 1); *L. Kronecker*, Berl. Ber. 1870, p. 883. Gruppen von Bewegungen hat *C. Jordan* untersucht, Par. C. R. 65, 1867, p. 229; Ann. di Mat. (2) 2, 1868, p. 167. Dann haben *F. Klein* u. *S. Lie* den Gruppenbegriff in den Mittelpunkt ihrer Untersuchungen gestellt, vgl. *S. Lie*, Christ. Forh. 1871, p. 243; Gött. Nachr. 1874, p. 529; *F. Klein*, Progr. Erlangen 1872. Vgl. auch *G. Frobenius* und *L. Stickelberger*, J. f. Math. 86, 1878, p. 217; *H. Weber*, Math. Ann. 20, 1882,

1. Es ist eine Vorschrift gegeben, nach der je zwei Elemente a, b des Systems ein drittes $ab = c$ eindeutig bestimmen.
2. Diese Komposition (Multiplikation) der Elemente ist associativ.
3. Aus $ab = ac$ folgt $b = c$, ebenso aus $ba = ca$.

Umfasst die Gruppe nur eine endliche Anzahl Elemente, so heisst sie eine *endliche*, genauer mit Rücksicht auf II A 6 eine *endliche discrete oder discontinuierliche*⁷²⁾. Für eine solche folgt aus (1) — (3): zu zweien ihrer Elemente a, b kann stets auf eine und nur auf eine Weise ein Element c so bestimmt werden, dass $ac = b$ ist; die Gruppe enthält ein Element e , die *Einheit*⁷³⁾, das mit jedem andern a $ae = a$ und $ea = a$ ergibt; zu jedem Elemente a giebt es ein zu ihm inverses $b = a^{-1}$, für das $ab = e$ ist⁷⁴⁾.

Jede Gruppe G der Ordnung N lässt sich als Substitutionsgruppe des Grades N darstellen⁷⁵⁾; diese Darstellung ist imprimitiv in Bezug auf jede Untergruppe von G .⁷⁶⁾ Enthält G einen Teiler H vom Index k , so ist G auch zu einer transitiven Substitutionsgruppe des Grades k ($l, 1$)-stufig homomorph, wenn l die Ordnung des grössten in H enthaltenen Normalteilers von G ist⁷⁷⁾.

16. Normalteiler. Kann ein Element P' einer Gruppe G aus einem andern P durch Transformation (Nr. 3) mittelst eines Elementes Q von G abgeleitet werden, so heissen P und P' innerhalb G *conjugiert*⁷⁸⁾ oder *gleichberechtigt*⁷⁹⁾. Durchläuft dann P einen Teiler H von G , so durchläuft P' einen zu H conjugierten oder mit H *gleichberechtigten Teiler* H' .⁸⁰⁾ Eine nur mit sich selbst gleichberechtigte Operation heisst *ausgezeichnet*. Ein nur mit sich selbst gleichberechtigter Theiler heisst

p. 302, sowie die Definition von *G. Frobenius*, Berl. Ber. 1895, p. 164: ein Complex G heisst eine Gruppe, wenn G durch G^2 teilbar ist; endlich auch *R. Dedekind* in *P. G. Lejeune-Dirichlet's Zahlentheorie*, 4. Aufl. (Braunsch. 1894), p. 484.

72) Übertragung des aus der Theorie der continuierlichen Gruppen stammenden Begriffs *Parametergruppe* auf discontinuierliche bei *E. Maillet*, Ann. di Mat. (2) 23, 1895, p. 199.

73) *Hauptgruppe* nach *G. Frobenius* u. *E. Stickelberger*, J. f. Math. 86, 1879 [78], p. 219.

74) Diese Eigenschaften können auch an Stelle von (3) in die Definition aufgenommen werden; so bei *Burnside*, theory p. 11.

75) *C. Jordan*, traité p. 57; *W. Dyck*, Math. Ann. 22, 1882, p. 84 („reguläre Form der Gruppe“); *groupe normal* bei *Borel et Drach* p. 261.

76) *W. Dyck*, a. a. O. p. 89.

77) *A. Capelli*, Giorn. di mat. 1878, p. 48; *Dyck* a. a. O. p. 91.

78) „conjugierte Gattungen rationaler Funktionen“ bei *L. Kronecker*, Berl. Ber. 1879, p. 212.

79) *F. Klein*, Math. Ann. 14, p. 430.

80) *equivalent groups* bei *T. P. Kirkman*, Manch. Mem. 2, 1862 [61] p. 78.

eigentlicher⁸¹⁾ oder *Normalteiler*⁸²⁾, ausgezeichnete⁸³⁾, invariante⁸⁴⁾ oder monotypische⁸⁵⁾ Untergruppe. Die mn Arrangements, die von einer Gruppe G mn^{ter} Ordnung unter sich vertauscht werden, zerfallen einem Normalteiler H vom Index m und der Ordnung n gegenüber in m Systeme zu je n ; die Operationen von H vertauschen die Arrangements in jedem einzelnen System, die übrigen von G die Systeme als ganze⁸⁶⁾. Die verschiedenen Vertauschungen der Systeme bilden eine Gruppe⁸⁷⁾ der Ordnung m , die mit G/H bezeichnet wird⁸⁸⁾. — Hat G keinen von G und H verschiedenen Normalteiler, der H enthält, so heisst H ein *grösster Normalteiler* von G ⁸⁹⁾.

Eine Gruppe heisst *einfach*⁹⁰⁾, wenn sie keinen von ihr selbst und von der Einheit verschiedenen Normalteiler hat; sonst *zusammengesetzt*.

Hat eine Gruppe G zwei verschiedene Normalteiler G_1, G_2 , die nur die 1 gemein haben, und ist jede Operation von G_1 mit jeder von G_2 vertauschbar, so heisst G das *direkte Produkt*⁹¹⁾ von G_1 und G_2 .

Die *alternierende Gruppe* ist einfach, ausser für $n = 4$.⁹²⁾

81) *E. Galois*, der die Bedeutung dieser speciellen Art Teiler für die Theorie der algebraischen Gleichungen zuerst erkannt hat, spricht von „*decomposition propre*“ einer Gruppe von Permutationen (d. h. arrangements), *oeuvr.* p. 25 (*revue encyclop.* 1832).

82) *H. Weber*, *Algebra*, 2, p. 11.

83) *S. Lie*, *Gött. Nachr.* 1874, p. 535; *F. Klein*, *Math. Ann.* 9, 1876 [75], p. 186.

84) *J. König*, *Math. Ann.* 21, 1883, p. 431.

85) *G. Frobenius*, *J. f. Math.* 101, 1887 [86], p. 285.

86) *E. Galois* a. a. O.; vgl. auch *oeuvr.* p. 45 (*J. de math.* 11, 1846 [31]).

87) Vgl. *E. Betti*, *Ann. fis. mat.* 3, 1852, p. 61 („gruppo delle permutazioni sopra i derivati“), wo aber nicht alles klar ist.

88) *C. Jordan*, *Bull. soc. math.* 1, 1873, p. 40; *O. Hölder*, *Math. Ann.* 34, 1889 [88], p. 33.

89) vgl. *C. Jordan*.

90) *indécomposable* bei *E. Galois*, *oeuvr.* p. 26 (*revue encyclop.*, 1832); *primo* bei *E. Betti*, *Ann. fis. mat.* 3, 1852, p. 62; *groupe de permutations inséparables* bei *M. Despeyroux*, *J. de math.* (2) 6, 1861, p. 433; *non-modular* bei *T. P. Kirkman*, *Manch. Mem.* (3) 1, 1862 [61], p. 283; *équation simple* bei *C. Jordan*, *J. de math.* 14, 1869, p. 139; *groupe simple* bei *dems.*, *traité* p. 41.

91) *O. Hölder*, *Math. Ann.* 43, 1893, p. 330; *zerlegbar* bei *G. Frobenius* u. *L. Stickelberger*, *J. f. Math.* 86, 1879 [78], p. 221; *eigentlich zerfallend* bei *W. Dyck*, *Math. Ann.* 17, 1880, p. 482. *O. Hölder*, *Math. Ann.* 43, p. 335 lässt „eigentlich“ weg.

92) *C. Jordan*, *traité* p. 66; *L. Kronecker*, *Berl. Ber.* 1879, p. 208; *F. Klein*, *Iksaeder*, *Leipz.* 1884, p. 18; *W. Burnside*, *theory* p. 153; *L. Bianchi*, *teoria* p. 61; *E. Beke*, *Math. Ann.* 49, 1897, p. 581.

Ein Normalteiler einer primitiven Gruppe ist notwendig transitiv⁹³⁾.

17. Kompositionsreihe. Eine Reihe von Gruppen:

$$G, H, J, \dots L, M = 1,$$

von denen jede grösster Normalteiler der vorhergehenden ist, heisst⁹⁴⁾ *Kompositionsreihe* von G . Die Gruppen $G/H, H/J, \dots L/M = L$ sind in allen Kompositionsreihen von G bis auf ihre Reihenfolge dieselben (im Sinne von Nr. 15)⁹⁵⁾. Eine Reihe:

$$G_1 G_2 \dots G_{x-1} G_x \dots G_{n-1} G_n = 1,$$

in der jedes G_x Normalteiler von G_{x-1} und G_1 ist und in die nicht noch weitere Glieder eingeschoben werden können, ohne dass die Reihe diese Eigenschaft verliert, heisst⁹⁶⁾ *Hauptreihe der Zusammensetzung* von G . Auch die Gruppen $G_1/G_2, G_2/G_3, \dots G_{n-1}/G_n = 1$ sind in allen solchen Reihen bis auf die Reihenfolge dieselben⁹⁷⁾. Kann man zwischen zwei Gliedern G_{x-1}, G_x einer Hauptreihe zur Bildung einer Kompositionsreihe noch Glieder $H_1, H_2, \dots H_n$ einschieben, so sind die Gruppen $G_{x-1}/H_1, H_1/H_2, \dots H_n/G_x$ einander gleich und die Gruppe G_{x-1}/G_x ist ihr direktes Produkt⁹⁸⁾.

18. Isomorphismen einer Gruppe mit sich selbst. Eine Gruppe G kann isomorph auf sich selbst bezogen werden, jedenfalls dadurch, dass man jeder ihrer Operationen A die transformierte $BA^{-1}B$ zuordnet, unter B eine bestimmte Operation von G selbst verstanden. Solche *Isomorphismen einer Gruppe in sich* heissen *cogredient*; giebt es noch andere, so heissen diese *contragredient*⁹⁹⁾. Die cogredienten Isomorphismen bilden eine zu G homomorphe Gruppe, speciell eine isomorphe, wenn G keine ausgezeichnete Ope-

93) Der Sache nach bei *P. Ruffini*, soc. It. mem. 9, 1802 [01], art. 29.

94) *C. Jordan*, J. de math. (2) 14, 1869, p. 139; der Name bei *E. Netto*, Subst.-Theorie p. 86.

95) *O. Hölder*, Math. Ann. 34, 1889 [88], p. 37; *G. Frobenius*, Berl. Ber. 1895, p. 169. Den Satz, dass die Ordnungszahlen der genannten Gruppen („Faktoren der Zusammensetzung“) constant sind, hatte schon *C. Jordan* bewiesen, J. de math. (2) 14, 1869, p. 139; einfacher *E. Netto*, J. f. Math. 78, 1874, p. 84.

96) *E. Netto*, Subst.-Th. p. 92; J. f. Math. 78, 1874, p. 82: „Grundreihe“. Vgl. *Burnside*, theory p. 123.

97) *O. Hölder*, Math. Ann. 34, 1889 [88], p. 38; die Constanz der Zahlenfaktoren schon bei *C. Jordan*, traité p. 663.

98) *O. Hölder* a. a. O.; vgl. auch *C. Jordan*, traité p. 48 und *E. Netto*, Subst.-Th. p. 95.

99) In einem speciellen Falle *F. Klein*, Ikosaeder, Leipzig 1882, p. 232; allgemein *O. Hölder*, Math. Ann. 43, 1893, p. 314.

ration ausser der 1 enthält¹⁰⁰). Die sämtlichen Isomorphismen bilden eine Gruppe, von der die der cogredienten Normalteiler ist¹⁰¹). Eine Gruppe G , die keine contragredienten Isomorphismen in sich zulässt und keine ausgezeichnete Operation ausser der 1 enthält, heisst *vollkommen*¹⁰²); ist eine solche Normalteiler einer andern Gruppe H , so ist H direktes Produkt von G und H/G .¹⁰³) Ein Teiler von G heisst *charakteristischer Teiler*¹⁰⁴), wenn er bei jedem Isomorphismus von G in sich übergeht.

19. Erzeugende Operationen. Geometrische Bilder von Gruppen. Können alle Operationen einer Gruppe aus q unter ihnen: $S_1, S_2, \dots S_q$ durch successive Produktbildung abgeleitet werden, so sagt man, diese Operationen *erzeugen*¹⁰⁵) die Gruppe. q Operationen, die durch keine andere Relation als:

$$S_1 S_2 \dots S_q = 1$$

verbunden sind, erzeugen eine unendliche discontinuierliche Gruppe. Man kann sie als Gruppe linearer Substitutionen einer complexen Variablen darstellen (II B 1); z. B. indem man mit T_x die Spiegelung am x^{ten} von $n+1$ Kreisen mit gemeinsamem Orthogonalkreis bezeichnet und $S_x = T_{x-1} T_x$ setzt; man erhält so eine Einteilung des Orthogonalkreisinnern in Gebiete, deren gegenseitige Lage die Beziehungen zwischen den Operationen der Gruppe veranschaulicht¹⁰⁶). Zu ihr ist die (unendliche oder endliche) Gruppe G homomorph, die von q Operationen erzeugt wird, die ausser (1) noch andern Relationen der Form

$$S_a^\alpha S_b^\beta S_c^\gamma \dots = 1$$

100) *W. Burnside*, theory p. 225.

101) *O. Hölder* a. a. O.

102) *O. Hölder*, Math. Ann. 46, 1895 [94], p. 325.

103) *ib.* — Die symmetrische Gruppe ist für jedes n vollkommen, ausser für $n=6$ (*ib.* p. 345); ebenso die lineare Gruppe für einen Primzahlmodul (für $x=1$ *ib.* p. 348, allg. *W. Burnside*, theory p. 239. 245). — Ist G als reguläre Substitutionengruppe von N Elementen dargestellt, so besteht die Gruppe H der Isomorphismen aus denjenigen Substitutionen derselben Elemente, die mit G vertauschbar sind (*G. Frobenius*, Berl. Ber. 1895, p. 185). Die Gruppe $GH = HG$ nennt *W. Burnside* „the holomorph of G “ (*ib.* p. 228).

104) *G. Frobenius*, Berl. Ber. 1895, p. 184. — Von einer „lückenlosen Reihe charakteristischer Teiler“ gelten analoge Sätze, wie die der Nr. 17 (*G. Frobenius*, *ib.* p. 1027).

105) *dérivé* bei *A. Cauchy*, exerc. d'anal. 3, 1844 [45], p. 183; Par. C. R. 21, 1845, p. 605. — Beispiele von nicht zerfallenden Gruppen, die nicht aus zwei Operationen erzeugt werden können, giebt *O. Hölder*, Math. Ann. 43, 1893, p. 341. 398.

106) *W. Dyck*, Math. Ann. 20, 1881, p. 7. — Vgl. übrigens II A 6 c.

genügen¹⁰⁷⁾. Der Identität von Γ entspricht dabei ein Normalteiler H von G und es ist $\Gamma = G/H$. Die zuerst abgegrenzten Gebiete lassen sich dann zu grösseren Bereichen so zusammenfassen, dass die Einteilung des Orthogonalkreises in diese Bereiche ein Bild von H , die Einteilung eines solchen Bereiches in die kleineren Gebiete ein Bild von Γ giebt^{107a)}. Die Kanten eines Bereiches sind dabei paarweise einander zugeordnet; fügt man je zwei zugeordnete aneinander, so entsteht eine Fläche von bestimmtem Geschlecht (III A 4). Die kleinste dabei mögliche Geschlechtzahl p heisst *Geschlecht der Gruppe*¹⁰⁸⁾; ist $p > 1$, so ist¹⁰⁹⁾ die Ordnung der Gruppe $\leq 84(p-1)$.

20. Abel'sche Gruppen. Ist die Composition der Elemente einer Gruppe commutativ, so heisst die Gruppe eine *Abel'sche*¹¹⁰⁾. In jeder solchen lassen sich q Erzeugende A, B, C der Ordnungen $a, b, c \dots$ so auswählen, dass die Formel:

$$\Theta = A^{\alpha} B^{\beta} C^{\gamma} \dots$$

jedes Element der Gruppe gerade einmal darstellt, wenn $\alpha, \beta, \gamma \dots$ bezw. volle Restsysteme nach den Moduln a, b, c durchlaufen¹¹¹⁾. Ein solches System von Erzeugenden heisst eine *Basis*¹¹²⁾ der Gruppe, der kleinste mögliche Wert von q ihr *Rang*¹¹³⁾. Man kann die Basis stets so wählen, dass $a, b, c \dots$ Primzahlpotenzen werden; für alle solchen Basen sind diese Werte abgesehen von der Reihenfolge die-

107) ib. p. 16.

107a) ib. p. 11.

108) ib. p. 31; vgl. *F. Klein*, ib. 14, 1873, p. 171.

109) *A. Hurwitz*, Math. Ann. 41, 1893, p. 424. — Eine andere geometrische Versinnlichung von Gruppen giebt *A. Cayley*, coll. pp. 10, p. 324 (Lond. Math. Proc. 9, 1878); (Amer. J. Math. 1, 1878, p. 574; 11, 1888, p. 139); vgl. auch *A. B. Kempe*, Lond. Trans. 177 I, 1886, p. 37. Über den Zusammenhang zwischen dieser und der des Textes vgl. *H. Maschke*, Amer. J. Math. 18, 1896 [95], p. 155; *W. Burnside*, theory, p. 306. — Noch eine andere Darstellung, für metacyklische Gruppen, bei *L. Heffter*, Math. Ann. 50, 1898 [97], p. 261.

110) Abelsche Gleichungen bei *L. Kronecker*, Berl. Ber. 1870, p. 882; *J. Perrott*, Amer. J. 11, 1889, p. 99; 13, 1891 [89], p. 235 sagt „groupes eulériens“.

111) Der Satz ist implicite in *N. H. Abel's* Untersuchungen über Gleichungen enthalten, ges. W. 1, p. 499 (J. f. Math. 4, 1839); andererseits in den Sätzen über die Composition der quadratischen Formen im Nachlasse von *C. F. Gauss*, ges. W. 2, p. 266 [a. d. J. 1801], und bei *E. Schering*, Gött. Abh. 14, 1868, p. 13; abstract bei *Kronecker*, Berl. Ber. 1870, p. 882. — *R. Levassieur*, Par. C. R. 122, 1896, p. 180 benutzt auch Galoissche Imaginäre als Exponenten.

112) *G. Frobenius* und *L. Stickelberger*, J. f. Math. 86, 1879 [78], p. 219. *Kronecker* a. a. O. sagt „Fundamentalsystem“.

113) *Frobenius* u. *Stickelberger* a. a. O.

selben, also *Invarianten* der Gruppe¹¹⁴). Man kann jeder Operation einer Abelschen Gruppe einen Zahlwert (eine Einheitswurzel) $\chi(A)$ so zuordnen, dass stets $\chi(AB) = \chi(A)\chi(B)$ wird; jedes System solcher Zahlen heisst ein *Charakter* der Gruppe¹¹⁵). Die Charaktere bilden selbst eine zur gegebenen isomorphe Gruppe; diejenigen, die in dieser Gruppe Elemente der Ordnung 2 sind, heissen *zweiseitig* (ancipites)¹¹⁶). Alle Elemente, für die alle zweiseitigen Charaktere dieselben Werte haben, bilden ein *Geschlecht* (genus); diejenigen, für die sie alle $= 1$ sind, das *Hauptgeschlecht*¹¹⁷).

Eine Gruppe, deren sämtliche Teiler Normalteiler sind, lässt sich in der Form:

$$R = PQ$$

darstellen, in der P eine Abel'sche Gruppe, Q eine bestimmte Gruppe 8. Ordnung ist^{117a}).

21. Die Sylow'schen Sätze. Eine Gruppe G , deren Ordnung N durch eine Primzahlpotenz p^* teilbar ist, hat¹¹⁸) mindestens einen Teiler der Ordnung p^* . Ist p^* die höchste Potenz von p , die in N aufgeht, so hat die Gruppe Teiler der Ordnung p^* ; ihre Anzahl ist $\equiv 1 \pmod{p}$, sie sind alle unter sich gleichberechtigt, und es ist $N = p^* r j$, wenn $p^* r$ die Ordnung des grössten Teilers von G ist, von dem ein solcher Teiler Normalteiler ist¹¹⁹). Auf diesen Sätzen

114) *H. Weber*, Algebra 2, p. 42; anders bei *Frobenius* und *Stickelberger* a. a. O. p. 236.

115) *H. Weber*, Math. Ann. 20, 1882, p. 307; vgl. übrigens *C. F. Gauss*, Disquis. arithm., 1801, art. 230 (ges. W. 1, p. 232); *R. Dedekind* in *P. G. L. Dirichlet's* Vorl. ü. Zahlentheorie, 1. Aufl., Braunschw. 1863, p. 349. — Verallgemeinerung für beliebige Gruppen bei *G. Frobenius*, Berl. Ber. 1896, p. 985.

116) *H. Weber*, Algebra 2, p. 52.

117) ib. p. 53. — Auch diese Begriffe stammen aus den disqu. arithm.

Den Abelschen Gruppen nahe stehen die Gruppen, deren Ordnung eine Primzahlpotenz ist; vgl. *E. Mathieu*, Ann. di mat. 4, 1861, p. 119; *L. Sylow*, Math. Ann. 5, 1872, p. 588; *A. Capelli*, Giorn. di mat. 10, 1878, p. 69; *E. Netto*, J. f. Math. 103, 1888 [87], p. 331; *J. W. A. Young*, Amer. J. 15, 1893 [92], p. 124; *G. Frobenius*, Berl. Ber. 1895, p. 173; sowie *Burnside*, theory cap. V.

117a) *R. Dedekind*, Math. Ann. 48, 1897 [96], p. 548. Er nennt Q die „Quaterniongruppe“, R eine „Hamilton'sche Gruppe“.

118) Für $\kappa = 1$ *A. Cauchy*, Par. C. R. 21, 1845, p. 850; exerc. d'anal. 3, p. 250; allg. *L. Sylow*, Math. Ann. 5, 1872, p. 584; dazu *E. Netto*, ib. 13, 1878 [77], p. 249; *G. Frobenius*, J. f. Math. 100, 1886 [84], p. 179; 101, 1887 [86], p. 282; Berl. Ber. 1895, p. 987.

119) *L. Sylow* a. a. O.; specielle Fälle bei *E. Mathieu*, J. de math. (2) 6, 1861, p. 308; *L. Sylow*, Christ. Förh. 1867, p. 109. 114. Noch nähere Angaben über j *L. Sylow*, Acta math. 11, 1888, p. 215; *G. Frobenius*, Berl. Ber. 1895, p. 174.

beruht die Diskussion der möglichen Typen von Gruppen gegebener Ordnungszahl.

22. Einfache Gruppen. Keine Primzahlpotenz kann Ordnung einer einfachen Gruppe sein¹²⁰⁾; ferner keine Zahl der Form $p_1^{\alpha_1} p_2^{\alpha_2} \dots p_q^{\alpha_q}$, wenn für jedes α : $p_{\alpha-1} > p_{\alpha}^{\alpha} p_{\alpha+1}^{\alpha+1} \dots p_q^{\alpha_q}$ ist¹²¹⁾; kein Produkt aus lauter verschiedenen Primfaktoren¹²²⁾; keine Zahl der Form $p^{\alpha} q^{\beta}$, wenn $p < q$ und β kleiner ist, als das Doppelte des Exponenten m , zu dem $q \pmod{p}$ gehört¹²³⁾; keine Zahl der Form $p^{\alpha} q^2$, wenn¹²⁴⁾ $p < q$; keine Zahl der Form $p^2 q^2 r^2$; ^{124a)} kein Produkt von weniger als sechs Primzahlen, ausser 60, 168, 660 und 1092; ¹²⁵⁾ keine gerade Zahl, die weder durch 12, noch durch 16, noch durch 56 teilbar ist¹²⁶⁾.

Unter den zusammengesetzten Zahlen ≤ 1092 sind nur die folgenden Ordnungszahlen einfacher Gruppen (und zwar nur von je einer¹²⁷⁾: 60, 168, 360, 504, 660, 1092.

Andererseits ergeben sich Typen von Ordnungszahlen einfacher Gruppen aus der Untersuchung der Zusammensetzung der in den Nrn. 10—12 besprochenen Gruppen¹²⁸⁾.

— Verallgemeinerung auf Teiler der Ordnung p^{α} , $\alpha < \kappa$, bei *G. Frobenius*, ib. p. 988; *E. Maillet*, Par. thèse 1892, p. 114; Par. C. R. 118, 1894, p. 1187; Toul. Ann. 9, 1895, p. D7.; auf Teiler der Ordnung $p^{\alpha} q^{\beta}$, *G. A. Miller*, N. Y. Bull. (2) 4, 1898, p. 326.

120) *L. Sylow*, Math. Ann. 5, 1872, p. 589.

121) ib.

122) *G. Frobenius*, Berl. Ber. 1893, p. 337.

123) Für $\beta = 1$ der Satz bei *G. Frobenius*, Berl. Ber. 1893, p. 340, Beweis Berl. Ber. 1895, p. 185 (eine Verallgemeinerung p. 192); für $\beta = m$ ib. p. 190; für $\beta = 4$, $q > p$ ib. 1893, p. 344; allgemein *W. Burnside*, theory p. 345.

124) *W. Burnside*, theory p. 348.

124a) *E. Maillet*, Quart. J. 29, 1897, p. 263.

125) *W. Burnside*, Lond. Math. Proc. 26, 1895, p. 211; p. 207 auch noch einige andere Formen; *G. Frobenius*, Berl. Ber. 1895, p. 335, p. 1041 (als Vermuthung ib. 1893, p. 338).

126) *W. Burnside*, Lond. Math. Proc. 26, 1895, p. 332. — Man kennt bis jetzt keine einfache Gruppe ungerader Ordnung (*W. Burnside*, theory p. 379).

127) Bis $N = 60$ *E. Galois*, oeuvr. p. 26 (revue encyclopédique, sept. 1832), ohne Bew.; bis 200 *O. Hölder*, Math. Ann. 40, 1892 [91], p. 55; bis 500, bezw. 560 *F. N. Cole*, Amer. J. 14, 1892, p. 388 und 15, 1893, p. 302 (über $N = 432$ vgl. auch *G. Frobenius*, Berl. Ber. 1893, p. 344); bis $N = 1092$ *W. Burnside*, Lond. Math. Proc. 26, 1895, p. 333. — Die Gruppen $N = 60$ und $N = 360$ sind die alternierenden Gruppen für $n = 5, 6$; die Gruppen $N = 60, 168, 660, 1092$ die der Modulargleichungen (Nr. 11) für $n = 5, 7, 11, 13$; nur die Einfachheit einer Gruppe $N = 504$ war neues Ergebnis dieser Untersuchungen. Die Gruppe selbst gehört zu einem von *E. Mathieu*, J. de math. (2) 6, 1861, p. 262 aufgestellten Typus.

128) Vgl. die Zusammenstellung von *E. H. Moore*, Chicago congress papers, 1896 [93], p. 208; dann *L. E. Dickson*, Quart. J. 29, 1897, p. 169.

23. Auflösbare Gruppen. Eine Gruppe, deren Faktoren der Zusammensetzung (Nr. 17) sämtlich Primzahlen sind, heisst *auflösbar*¹²⁹). Bei der Untersuchung solcher Gruppen hat man nicht nach der Ordnung, sondern nach dem Grad geordnet, mit Rücksicht auf die Anwendung zur Auflösung von Gleichungen durch Radikale. Eine transitive Gruppe, deren Grad zwei verschiedene Primzahlen enthält, kann nur auflösbar sein, wenn sie imprimitiv ist¹³⁰). Eine transitive Gruppe, deren Grad Primzahl ist, ist dann und nur dann auflösbar, wenn sie in der linearen Gruppe für $\kappa = 1$ enthalten ist¹³¹). Eine primitive Gruppe, deren Grad Primzahlpotenz p^κ ist, kann nur auflösbar sein, wenn sie in der linearen Gruppe enthalten ist¹³²).

Über die Bildung zusammengesetzter Gruppen aus gegebeneneren einfachen vgl. man *O. Hölder*, Math. Ann. 46, 1895 [94], p. 321; *E. Maillet*, Par. thèse.

Aufzählung aller Gruppen bestimmter Ordnung geben:

für $N = 2 - 12$ *A. B. Kempe*, Lond. Trans. 177 I, 1886, p. 37; *A. Cayley*, Amer. J. 11, 1889, p. 144 = coll. pp. 12, p. 639.

$N = 24$ *W. Burnside*, theory p. 101;

bis $N = 32$ *G. A. Miller*, Par. C. R. 122, 1896, p. 370;

bis $N = 48$ *G. A. Miller*, Qu. J. 28, 1896, p. 232;

für $N = p, p^2, pq$ *E. Netto*, Subst.-Th. p. 133;

für $N = p^3, p^2q, pqr$ *F. N. Cole* und *J. W. Glover*, Amer. J. Math. 15, 1893 [92], p. 191; *O. Hölder*, Math. Ann. 43, 1893, p. 301; *R. Levassieur*, Par. C. R. 120, 1895, p. 822;

für $N = p^4$ *O. Hölder* a. a. O.; *J. Young*, Amer. J. Math. 14, 1893 [92], p. 124;

für $N = 2^\omega$ *Levassieur*, Par. C. R. 120, 1895, p. 899;

für quadratfreie Ordnungszahlen *O. Hölder*, Gött. Nachr. 1895, p. 211.

129) *résoluble* bei *C. Jordan*, J. de math. (2) 12, 1867, p. 111. *H. Weber*, Algebra 1, p. 598; 2, p. 27 gebraucht „metacyklisch“ in diesem Sinne.

130) *E. Galois*, oeuvr. p. 11 (Bull. Fér. 13, 1830); p. 27 (rev. encycl. 1832); Bew. skizziert p. 51 (J. de math. 11, 1846 [31]); ausgeführt von *E. Betti*, Ann. mat. fis. 3, 1852, p. 71. 107, u. *C. Jordan*, J. éc. polyt. cah. 38, 1861, p. 190. Vgl. den entsprechenden Satz über Gleichungen bei *N. H. Abel*, oeuvr. 2, p. 222 (a. d. J. 1828, publ. 1839), p. 262 (a. d. J. 1826).

131) *E. Galois*, oeuvr. p. 11 (Bull. Fér. 13, 1830), p. 23 (ib.); Bew. p. 46 (J. de math. 11, 1846 [31]). Der Satz von *N. H. Abel*, oeuvr. 2, p. 222. 233 [a. d. J. 1828, publ. 1839]; vgl. auch p. 256. 260. 262. 266. 270. 279) sagt für die Gruppen aus: eine Gruppe von Primzahlgrad ist nur auflösbar, wenn ihre Klasse $\geq p - 1$ ist. Ableitung des Galoisschen Kriteriums aus dem Abelschen bei *E. Betti*, Ann. mat. fis. 2, 1851, p. 9.

132) *E. Galois*, oeuvr. p. 27 (revue encyclop. 1832); Bew. für $\kappa = 2$ p. 53 (J. de math. 11, 1846 [31]) (vorher p. 11. 22 unrichtige Angaben). *C. Jordan* hat das Problem, alle auflösbaren Gruppen des Grades p^κ zu finden, die nicht in noch umfassenderen solchen Gruppen enthalten sind, auf die Lösung desselben Problems für kleinere Gradzahlen zurückgeführt, Par. C. R. 64, 1867, p. 269. 586. 1179; 72, 1871, p. 283; J. de math. (2) 12, 1867, p. 105. 109; traité p. 383—662.

24. Gruppendeterminante. Ordnet man jeder Operation R einer Gruppe eine Variable x_R zu und bildet die Determinante:

$$|x_{PQ^{-1}}| \quad (P, Q = R_0, R_1, R_2, \dots R_{N-1}),$$

so heisst sie *die Determinante der Gruppe*¹³³). Ist die Gruppe eine Abelsche, so ist die Determinante gleich einem Produkt von Linearfaktoren¹³⁴), die die Charaktere zu Coefficienten haben¹³⁵). Im allgemeinen zerfällt sie in eine Reihe von Faktoren, deren Anzahl gleich ist der Anzahl nicht gleichberechtigter Operationen der Gruppe¹³⁶), jeder zu einer Potenz erhoben, deren Exponent seinem Grade f gleich ist¹³⁷). Jedem solchen Factor entspricht eine „primitive“ Darstellung der Gruppe durch lineare homogene Substitutionen zwischen f Variablen¹³⁸).

Ausgeführte Aufzählung für $n = 2$ J. de math. (2) 13, 1868, p. 111; andererseits auch implicite bei J. Gierster, Math. Ann. 18, 1881, p. 319. Vgl. auch E. Betti, Par. C. R. 48, 1859, p. 182.

133) R. Dedekind bei G. Frobenius, Berl. Ber. 1896, p. 986. 1343.

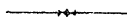
134) W. Burnside, Mess. (2) 23, 1894 [93], p. 112; specielle Fälle sind schon länger bekannt, vgl. die Citate bei G. Frobenius a. a. O. p. 1008, sowie I A 2, Nr. 26.

135) G. Frobenius a. a. O. p. 1363.

136) ib. p. 1368.

137) ib. p. 1375.

138) ib. 1897, p. 994. — Vgl. Abschnitt I B 3 f.



23. Auflösbare Gruppen. Eine Gruppe, deren Faktoren der Zusammensetzung (Nr. 17) sämtlich Primzahlen sind, heisst *auflösbar*¹²⁹). Bei der Untersuchung solcher Gruppen hat man nicht nach der Ordnung, sondern nach dem Grad geordnet, mit Rücksicht auf die Anwendung zur Auflösung von Gleichungen durch Radikale. Eine transitive Gruppe, deren Grad zwei verschiedene Primzahlen enthält, kann nur auflösbar sein, wenn sie imprimitiv ist¹³⁰). Eine transitive Gruppe, deren Grad Primzahl ist, ist dann und nur dann auflösbar, wenn sie in der linearen Gruppe für $\kappa = 1$ enthalten ist¹³¹). Eine primitive Gruppe, deren Grad Primzahlpotenz p^κ ist, kann nur auflösbar sein, wenn sie in der linearen Gruppe enthalten ist¹³²).

Über die Bildung zusammengesetzter Gruppen aus gegebeneren einfachen vgl. man *O. Hölder*, Math. Ann. 46, 1895 [94], p. 321; *E. Maillet*, Par. thèse.

Aufzählung aller Gruppen bestimmter Ordnung geben:

für $N = 2-12$ *A. B. Kempe*, Lond. Trans. 177 I, 1886, p. 37; *A. Cayley*, Amer. J. 11, 1889, p. 144 = coll. pp. 12, p. 639.

$N = 24$ *W. Burnside*, theory p. 101;

bis $N = 32$ *G. A. Miller*, Par. C. R. 122, 1896, p. 370;

bis $N = 48$ *G. A. Miller*, Qu. J. 28, 1896, p. 232;

für $N = p, p^2, pq$ *E. Netto*, Subst.-Th. p. 133;

für $N = p^3, p^2q, pqr$ *F. N. Cole* und *J. W. Glover*, Amer. J. Math. 15, 1893 [92], p. 191; *O. Hölder*, Math. Ann. 43, 1893, p. 301; *R. Levassieur*, Par. C. R. 120, 1895, p. 822;

für $N = p^4$ *O. Hölder* a. a. O.; *J. Young*, Amer. J. Math. 14, 1893 [92], p. 124;

für $N = 2^w$ *Levassieur*, Par. C. R. 120, 1895, p. 899;

für quadratfreie Ordnungszahlen *O. Hölder*, Gött. Nachr. 1895, p. 211.

129) *résoluble* bei *C. Jordan*, J. de math. (2) 12, 1867, p. 111. *H. Weber*, Algebra 1, p. 598; 2, p. 27 gebraucht „metacyklisch“ in diesem Sinne.

130) *E. Galois*, oeuvr. p. 11 (Bull. Fér. 13, 1830); p. 27 (rev. encycl. 1832); Bew. skizziert p. 51 (J. de math. 11, 1846 [31]); ausgeführt von *E. Betti*, Ann. mat. fis. 3, 1852, p. 71. 107, u. *C. Jordan*, J. éc. polyt. cah. 38, 1861, p. 190. Vgl. den entsprechenden Satz über Gleichungen bei *N. H. Abel*, oeuvr. 2, p. 222 (a. d. J. 1828, publ. 1839), p. 262 (a. d. J. 1826).

131) *E. Galois*, oeuvr. p. 11 (Bull. Fér. 13, 1830), p. 23 (ib.); Bew. p. 46 (J. de math. 11, 1846 [31]). Der Satz von *N. H. Abel*, oeuvr. 2, p. 222. 233 [a. d. J. 1828, publ. 1839]; vgl. auch p. 256. 260. 262. 266. 270. 279) sagt für die Gruppen aus: eine Gruppe von Primzahlgrad ist nur auflösbar, wenn ihre Klasse $\geq p - 1$ ist. Ableitung des Galoisschen Kriteriums aus dem Abelschen bei *E. Betti*, Ann. mat. fis. 2, 1851, p. 9.

132) *E. Galois*, oeuvr. p. 27 (revue encyclop. 1832); Bew. für $\kappa = 2$ p. 53 (J. de math. 11, 1846 [31]) (vorher p. 11. 22 unrichtige Angaben). *C. Jordan* hat das Problem, alle auflösbaren Gruppen des Grades p^κ zu finden, die nicht in noch umfassenderen solchen Gruppen enthalten sind, auf die Lösung desselben Problems für kleinere Gradzahlen zurückgeführt, Par. C. R. 64, 1867, p. 269. 586. 1179; 72, 1871, p. 283; J. de math. (2) 12, 1867, p. 105. 109; traité p. 383—662.

24. Gruppendeterminante. Ordnet man jeder Operation R einer Gruppe eine Variable x_R zu und bildet die Determinante:

$$|x_{PQ-1}| \quad (P, Q = R_0, R_1, R_2, \dots R_{N-1}),$$

so heisst sie *die Determinante der Gruppe*¹³³⁾. Ist die Gruppe eine Abelsche, so ist die Determinante gleich einem Produkt von Linearfaktoren¹³⁴⁾, die die Charaktere zu Coefficienten haben¹³⁵⁾. Im allgemeinen zerfällt sie in eine Reihe von Faktoren, deren Anzahl gleich ist der Anzahl nicht gleichberechtigter Operationen der Gruppe¹³⁶⁾, jeder zu einer Potenz erhoben, deren Exponent seinem Grade f gleich ist¹³⁷⁾. Jedem solchen Factor entspricht eine „primitive“ Darstellung der Gruppe durch lineare homogene Substitutionen zwischen f Variablen¹³⁸⁾.

Ausgeführte Aufzählung für $n=2$ J. de math. (2) 13, 1868, p. 111; andererseits auch implicite bei J. Gierster, Math. Ann. 18, 1881, p. 319. Vgl. auch E. Betti, Par. C. R. 48, 1859, p. 182.

133) R. Dedekind bei G. Frobenius, Berl. Ber. 1896, p. 986. 1343.

134) W. Burnside, Mess. (2) 23, 1894 [93], p. 112; specielle Fälle sind schon länger bekannt, vgl. die Citate bei G. Frobenius a. a. O. p. 1008, sowie I A 2, Nr. 26.

135) G. Frobenius a. a. O. p. 1363.

136) ib. p. 1368.

137) ib. p. 1375.

138) ib. 1897, p. 994. — Vgl. Abschnitt I B 3 f.

IB1a. RATIONALE FUNKTIONEN EINER VERÄNDERLICHEN; IHRE NULLSTELLEN

VON

E. NETTO

IN GIESSEN.

Inhaltsübersicht.

1. Definitionen.
2. Konstantenzählung. Interpolationsproblem. Partialbrüche.
3. Interpolations- und Ausgleichungs-Rechnung.
4. Differenzenrechnung.
5. Wurzeln und ihre Multiplizität. Nullstellen.
6. Ableitung und Stetigkeit.
7. Fundamentaltheorem der Algebra.
8. Zerlegung in Faktoren.
9. Rationalitätsbereich.
10. Reduktibilität. Irreduktibilität.
11. Teilbarkeitseigenschaften.
12. Grösster gemeinsamer Teiler.
13. Irreduktible Funktionen.
14. Trennung vielfacher Wurzeln.
15. Algebraische Kongruenzen.
16. Resultantendarstellung.
17. Bedingungen für gemeinsame Teiler.
18. Eigenschaften der Resultanten.
19. Berechnung der Resultanten.
20. Diskriminanten.
21. Eigenschaften der Diskriminanten.
22. Diskriminantenfläche.
23. Gleichungen mit reellen Wurzeln. Realitätsverhältnisse.
24. Hinweise auf angrenzende Gebiete. Verzeichnis der Abkürzungen.

Litteratur.

Monographien grösseren Umfanges, welche das gesamte Gebiet der rationalen Funktionen und nur dieses umfassen, bestehen nicht. In den meisten Lehrbüchern der Algebra und in einigen der Analysis sind die dahingehörigen Kapitel zu suchen. Das ist bei den folgenden Angaben zu berücksichtigen.

R. Baltzer, Theorie und Anwendung der Determinanten. 5. Aufl. Leipzig 1881.
F. Faà di Bruno, Théorie des formes binaires. Turin 1876. Mit Unterstützung von *M. Noether* deutsch von *Th. Walter*. Leipzig 1881.

- Sn. Burnside and W. Panton*, Theory of equations. 3. ed. Dublin 1892. New-York 1893.
A. Capelli, Lezioni di Algebra complementare. 2. Aufl. Napoli 1898.
P. Gordan, Vorlesungen über Invariantentheorie, herausgeg. von *G. Kerschens-
 steiner*. I. Determinanten. Leipzig 1885. II. Binäre Formen. Leipzig 1887.
H. Laurent, Traité d'Algèbre. 4. et 5. éd. Paris 1887—1894.
E. Netto, Vorlesungen über Algebra. I. Leipzig 1896. II. Leipzig 1898/99.
S. Pincherle, Algebra complementare. Milano 1893—1894.
G. Salmon, Modern higher Algebra. 4. ed. Dublin 1885. Deutsch von *W. Fiedler*.
 2. Aufl. Leipzig 1877.
J.-A. Serret, Algèbre supérieure. 5. éd. Paris 1885. Deutsch von *G. Wertheim*.
 2. Aufl. Leipzig 1878.
O. Stolz, Allgemeine Arithmetik. 2. 4. Abschn. Leipzig 1886.
C. Chrystal, Algebra. Edinburgh. 1. 1886. 2. 1889.
E. Cesàro, Corso di Analisi algebrica. Torino 1894.
H. Weber, Lehrbuch der Algebra. 2. Aufl. I. Braunschweig 1898. II. ib. 1899.
N. Cor et J. Riemann, Traité d'algèbre élémentaire. Paris 1898.

1. Definitionen. Ein Ausdruck von der Form

$$f(z) = a_0 z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_{n-1} z + a_n,$$

in welchem die a Konstanten und z eine Veränderliche bedeuten, heisst eine *ganze Funktion* (gz. F.) *der Variablen* z vom *Grade* n ; die a_0, a_1, \dots, a_n heissen ihre *Koeffizienten* (Koeff.). Der Ausdruck Funktion rührt in diesem und in allgemeinerem Sinne von *G. W. Leibniz* her¹); die symbolische Bezeichnung $f(z)$ hat nach *R. Baltzer's* Angabe²) zuerst *A. Cl. Clairaut* angewendet. Der Quotient zweier ganzer Funktionen heisst eine *gebrochene Funktion* (gbr. F.); gz. und gbr. F. werden als *rationale Funktionen* (rat. F.) zusammengefasst³). Haben die Koeff. a keinen gemeinsamen Teiler, dann heisst f eine *primitive F.*⁴). Das Produkt zweier primitiver F. ist eine ebensolche F.⁵). Setzt man $y^n f(x:y)$ an, so wird dies homogen und heisst eine *binäre Form* n^{ten} Grades (vgl. Nr. 24).

2. Konstantenzählung. Interpolationsproblem. Partialbrüche.
 $f(z)$ enthält $(n+1)$ Konstanten und ist daher bestimmt, wenn man

1) Acta Eruditorum Lips. 1694, p. 306. Ganz modern definiert schon *Joh. Bernoulli I.* (Paris Mém. 1718, p. 100 = Oeuvres [Laus. et Genève 1742] 2, p. 241): „On appelle ici fonction d'une grandeur variable une quantité composée de quelque manière que ce soit de cette grandeur variable et de constantes.“
Leibniz schloss sich dem an; *Commerc. epist.* I, p. 386.

2) Elemente d. Math. 1, Leipzig 1872, p. 214 [7. Aufl. 1885, p. 236].

3) *L. Euler*, Introductio in anal. infin. Lausannae 1748. Lib. I. Cap. I. § 1—9.

4) Eingeführt von *C. F. Gauss*, Disq. arithm. § 226. — *H. Weber*, Algebra. 1, § 2. — *L. Kronecker*, Grundzüge einer arithm. Theorie der algebr. Grössen, J. f. Math. 92 (1882), p. 49.

5) Vgl. Nr. 9; (*Gauss's* Satz).

den Werten z_0, z_1, \dots, z_n des Argumentes z ($n+1$) Werte u_0, u_1, \dots, u_n der F. zuordnet. Die Bestimmung kann durch die Lösung eines Systems linearer Gleichungen (Gl.) mit der Determinante $|z_\lambda^\kappa|$ bei ($\kappa, \lambda = 0, 1, \dots, n$) geschehen und ist, da für verschiedene z_λ die Determinante $\neq 0$ wird, stets eindeutig möglich.

Dieses *Interpolationsproblem* findet seine Erledigung durch mancherlei Interpolationsformeln. Eine solche stammt von *J. Newton* her⁶); sie hat die Gestalt

$$f(z) = c_0 + c_1(z - z_0) + c_2(z - z_0)(z - z_1) + c_3(z - z_0)(z - z_1)(z - z_2) + \dots, \\ c_0 = u_0; c_1 = \frac{u_0}{z_0 - z_1} + \frac{u_1}{z_1 - z_0}; c_2 = \frac{u_0}{(z_0 - z_1)(z_0 - z_2)} + \dots + \frac{u_2}{(z_2 - z_0)(z_2 - z_1)}; \dots$$

Eine andere Formel, die sich aus dieser leicht ableiten lässt (wie auch umgekehrt), hat *J. L. Lagrange* gegeben⁷). Setzen wir

$$g(z) = (z - z_0)(z - z_1) \dots (z - z_n)$$

und bezeichnen mit $g'(z)$ die *Ableitung* (vgl. Nr. 6) von $g(z)$, so ist

$$f(z) = \sum u_\lambda \frac{g(z)}{(z - z_\lambda) g'(z_\lambda)} \quad (\lambda = 0, 1, \dots, n),$$

wobei die Bedeutung jedes einzelnen Gliedes klar ist. Aus ihr folgen, wenn man $u_\lambda = f(z_\lambda)$ setzt, die *Euler'schen Formeln*⁸)

$$\sum_\lambda \frac{z_\lambda^\kappa}{g'(z_\lambda)} = \begin{cases} 0 & (\kappa < n) \\ 1 & (\kappa = n) \end{cases} \quad (\lambda = 0, 1, \dots, n),$$

aus denen man umgekehrt die *Lagrange'sche* Formel herleiten kann. In beiden müssen die z_λ ihrer Bedeutung nach von einander verschieden sein. *Jacobi* gab Ausdehnungen für den Fall gleicher Werte z_λ .⁹) Über den Fall $\kappa > n$ vgl. *F. Brioschi*, J. f. Math. 50 (1855), p. 239.

Die Formeln reichen zur Zerlegung einer gebr. F. in *Partialbrüche* aus, d. h. in Brüche, deren Nenner nur für je einen einzigen Wert von z verschwinden, und deren Zähler zugleich konstant sind¹⁰). Vgl. Nr. 5, sowie den Schluss von Nr. 14.

6) Princip. Phil. Nat. ed. Amstelod. 1723, Lib. III, lemma 8; p. 446. Vgl. auch *J. Fr. Encke*, Berl. Astr. Jahrb. für 1830, p. 265 (1828).

7) J. Éc. polyt. cah. 8 (1812), p. 277 = Oeuvres 7, p. 285.

8) Institut. Calc. Integr. Petrop. 1768—1770, 2, § 1169.

9) Diss. Berol. 1825 = Werke 3, p. 1. — Auch *Ch. Hermite* hat (J. f. Math. 84 [1878], p. 70) eine Erweiterung in analytischer Behandlung geliefert, nämlich die, eine Funktion $F(x)$ des Grades $(n-1)$ herzustellen, welcher n Werte

$$F^{(\kappa)}(z_\lambda) \quad \text{für } \lambda = 1, 2, \dots, l; \quad \kappa = 1, 2, \dots, k_\lambda \quad \left(\sum k_\lambda = n \right)$$

vorgeschrieben sind, wenn dabei $F^{(\kappa)}(z)$ die κ te Ableitung von $F(z)$ bedeutet.

10) Diese Art der Zerlegung stammt von *Leibniz*, Acta Erud. Lips. 1702, p. 210; 1703, p. 19 = Op. 3, p. 65, 66. Weiter siehe *Euler*, Introd. Cap. 2. u. 12;

A. L. *Cauchy* lieferte eine Erweiterung der Interpolationsformel auf gebr. F.¹¹⁾, ohne einen Beweis für sie zu geben; K. G. J. *Jacobi* gab ihn¹²⁾ und diskutierte eingehend verschiedene Darstellungsformen für Zähler und Nenner. *Kronecker* zeigte, dass die *Cauchy'sche* Aufgabe nicht stets lösbar sei, und stellte die Bedingungen fest, unter denen sie es ist¹³⁾. An die *Cauchy'sche* Formel lassen sich, ähnlich wie an die *Lagrange'sche* andere vom Charakter der obigen *Euler'schen* anknüpfen¹⁴⁾.

L. *Stickelberger* verallgemeinert die Interpolationsaufgabe in der Weise, dass er die Reste $\varphi_\lambda(z)$ vorschreibt, welche $f(z)$ bei der Division durch gegebene Funktionen $h_\lambda(z)$ haben soll¹⁵⁾.

3. Interpolations- und Ausgleichungs-Rechnung. Die charakteristische Aufgabe für Interpolationsformeln liegt darin, an die Stelle einer F., deren analytischer Ausdruck unbekannt oder unbequem ist, eine bekannte oder bequemere aus gegebenen numerischen Werten gebildete zu setzen, die sich innerhalb gewisser Grenzen statt jener zu numerischen Zwecken benutzen lässt¹⁶⁾. Das einfachste und zugleich wichtigste Problem tritt auf, wenn die z_λ äquidifferent sind, $z_1 - z_0 = h$, $z_2 - z_1 = h, \dots$. Setzt man, wie in der *Differenzenrechnung* (vgl. Nr. 4) als Symbole für Differenzen erster und höherer Ordnungen

$\Delta u_\mu = u_{\mu+1} - u_\mu$; $\Delta^2 u_\mu = \Delta u_{\mu+1} - \Delta u_\mu$; $\Delta^3 u_\mu = \Delta^2 u_{\mu+1} - \Delta^2 u_\mu$; ... dann liefert die *Newton'sche* Formel aus Nr. 2 in der Gestalt

$$f(z) = u_0 + (z - z_0) \frac{\Delta u_0}{h} + \frac{(z - z_0)(z - z_1)}{1 \cdot 2} \frac{\Delta^2 u_0}{h^2} + \dots \\ + \frac{(z - z_0) \cdots (z - z_{n-1})}{n!} \frac{\Delta^n u_0}{h^n}.$$

Inst. calc. diff. 2, Cap. 18. — Ausführliche Litteraturangaben liefert A. L. *Crelle*, J. f. Math. 9 (1832) p. 231; 10 (1833), p. 42. Ferner siehe *Jacobi* (Anm. 9) und *Gauss*, Werke 3; Nachlass p. 265, § 3. — *Jacobi* dehnt die Zerlegung auch auf den Fall aus, dass als die Nenner der einzelnen Partialbrüche die Produkte mehrerer Wurzelfaktoren $(z - z_\lambda)(z - z_\mu)$ auftreten.

11) Cours d'analyse, Paris 1821, Note V.

12) J. f. Math. 30 (1846), p. 127 = Werke 3, p. 479. Vgl. auch Nr. 16, F. *Rosenhain*.

13) Berl. Ber. 1881 Juni, p. 535, bes. § II. Vgl. auch *Netto*, Math. Ann. 42 (1893), p. 453.

14) *Netto*, Zeitschr. Math. Phys. 41 (1896), p. 107.

15) Math. Ann. 30 (1887), p. 405.

16) S. F. *Lacroix*, Traité des différences et des séries; Paris 1800. — J. *Stirling*, Tractatus de summatione et interpolatione serierum infinitarum, Lond. 1730; unvollst. schon Lond. Trans. 1718. — *Lagrange*, Leçons élémentaires (V leg.). Oeuvres 7. — A. *Markoff*, Differenzenrechnung, St. Petersburg. 1891 (deutsch von Th. *Friesendorff* und E. *Prümm*. Leipzig 1896, Teil I), wo ausführliche Litteraturangaben zu finden sind.

die Lösung des Problems durch Angabe einer interpolierenden Funktion n^{ten} Grades¹⁷⁾. *J. F. Encke*¹⁸⁾ bearbeitete eine von *J. Stirling*¹⁹⁾ gegebene Methode, von der Mitte der gegebenen Werte aus zu interpolieren; diese ist deshalb von Wichtigkeit, weil der Fehler der Interpolation am kleinsten wird, wenn man das z des gesuchten u möglichst nahe an die Mitte der gegebenen Werte legt. Man vgl. I D 3.

Auf Interpolation durch periodische Reihen und durch Exponentialfunktionen sei hingewiesen²⁰⁾. Die Interpolation des Integrals einer F. aus einzelnen Werten derselben heisst „*mechanische Quadratur*“ und gehört in den Bereich der Integralrechnung²¹⁾. [II A 2 Nr. 50 u. f.]

Mit der Interpolationsrechnung steht die *Ausgleichungsrechnung* insofern in Zusammenhang, als bei ihr zur Bestimmung einer Funktion n^{ten} Grades f mehr als $(n + 1)$ Werte u_α gegeben sind; dabei handelt es sich dann um Herstellung einer Funktion f , welche sich den gegebenen Werten „möglichst gut“ anschmiegt. Siehe I D 2, wo auch darzulegen sein wird, in welcher Art diese unbestimmt gehaltene Forderung bei willkürlichen u_α zu präzisieren ist.

4. Differenzenrechnung. Die Differenzenrechnung untersucht den Zusammenhang zweier F. $F(x)$ und $f(x)$, die in der Beziehung stehen

$$f(x) = \Delta F(x) = F(x + h) - F(x),$$

wobei h eine gegebene Zahl bedeutet; und deshalb gehört, soweit F oder f ganze F. sind, ein Hinweis an diese Stelle²²⁾. Für eine willkürliche Reihe von Grössen u_0, u_1, u_2, \dots gelten die Einführungen $\Delta u, \Delta^2 u, \Delta^3 u, \dots$ der vorigen Nummer. Man kann symbolisch setzen

$$\Delta^n u_\alpha = (u - 1)^{(n)} u^{(\alpha)}; \quad u_{n+\alpha} = (1 + \Delta)^{(n)} u_\alpha,$$

wobei nach Unterdrückung der Exponentenklammern und Ausführung des Potenzierens u_x statt u^x zu setzen und $\Delta^x u_\alpha$ als x^{te} Differenz aufzufassen ist.

Die m^{te} Differenz $\Delta^m F$ einer gz. F. des Grades $n (\geq m)$ ist eine

17) Brief an *H. Oldenburg*, Okt. 24. 1676; auf mehrere Variable ausgedehnt von *Lacroix*, l. c. § 894; umgeformt von *P. S. Laplace*, *Théorie anal. des probab.* Paris 1812 = *Oeuvres* 3, p. 13.

18) *Berl. astron. Jahrb. für 1837* (1835), p. 251.

19) l. c. Anm. 16, *Propos.* 20.

20) *Gauss*, *Werke* 3, p. 279 ff.; *F. W. Bessel*, *Abhandl.* 2, p. 364, 393; *Encke*, *Berl. astron. Jahrb. für 1860* (1857), *Abh.* I. — *M. R. de Prony*, *J. Éc. Polytechn.* 2 (1795, an IV.), p. 24.

21) *Markoff*, l. c. Anm. 16, *Kap.* V.

22) *J. Fr. W. Herschel*, *Collect. of exampl. of the applic. of the calcul. of finite differences.* *Cambr.* 1820.

gz. F. des Grades $(n-m)$. Ist $f(x)$ eine gz. F. von x des Grades n , so ist $F(x)$ eine solche des Grades $(n+1)$.

Eine allgemeine Differenzengleichung ist von der Form

$$\Phi(x, f(x), \Delta f(x), \Delta^2 f(x), \dots, \Delta^m f(x)) = 0,$$

in der Φ eine gegebene und $f(x)$ die unbekannte F. bedeutet; man kann ihr die Form geben, in welcher h bekannt ist:

$$\Psi(x, f(x), f(x+h), \dots, f(x+mh)) = 0.$$

Das Problem, $f(x)$ zu finden, findet seine Besprechung in I E.²³⁾

5. Wurzeln und ihre Multiplizität. Nullstellen. Die Differenz $f(z) - f(z_1)$ ist durch $(z - z_1)$ teilbar, und der Quotient $f_1(z)$ wird dabei eine gz. F. $(n-1)$ ten Grades, deren höchster Koeff. wieder a_0 ist. Falls also $f(z_1) = 0$ wird, hat man $f(z) = (z - z_1)f_1(z)$. Wird ebenso für einen Wert z_2 wieder $f_1(z_2) = 0$, so folgt ebenso $f(z) = (z - z_1)(z - z_2)f_2(z)$, wo f_2 vom Grade $(n-2)$ ist, u. s. f. So kommt man möglicherweise zu einer Zerlegung in n Linearfactoren

$$f(z) = a_0(z - z_1)(z - z_2) \cdots (z - z_n).$$

Einen Wert z_1 , der $f(z_1) = 0$ macht, nennt man eine *Wurzel* (W.) der Gl. $f(z) = 0$, häufig auch eine *Nullstelle* von $f(z)$. Mehr als n W. kann eine Gl. n ten Grades nicht haben, ohne dass ihr Polynom identisch verschwindet. Dies war schon *Newton* bekannt²⁴⁾. Ob eine Zerlegung in n Linearfactoren stets möglich ist, steht noch dahin (vgl. Nr. 7). Aus dem Satze über die Maximalanzahl der W. folgt, dass zwei gz. F. n ten Grades gleiche Koeff. haben, wenn ihre numerischen Werte für $(n+1)$ Argumente übereinstimmen.

Findet obige Zerlegung statt, so können mehrere z_i gleich werden. Ist $f(z)$ durch $(z - z_1)^{\mu_1}$ aber durch keine höhere Potenz von $(z - z_1)$ teilbar, dann heisst z_1 eine μ_1 -fache W. oder eine W. von der *Multiplizität* μ_1 . Ordnet man nach den von einander verschiedenen Wurzeln so kann man mit Hervorhebung der Multiplizität schreiben

$$f(z) = a_0(z - z_1)^{\mu_1}(z - z_2)^{\mu_2} \cdots (\mu_1 + \mu_2 + \cdots = n).$$

Hat bei einer Partialbruch-Zerlegung der Nenner die μ -fache W. z_1 , so treten μ Brüche auf, deren Nenner für $z = z_1$ Null ist,

$$\frac{c_0}{(z - z_1)^\mu} + \frac{c_1}{(z - z_1)^{\mu-1}} + \cdots + \frac{c_{\mu-1}}{z - z_1}.$$

23) Vgl. *Laplace*, Anm. 17. — *Lagrange*, Recherches sur les suites récurrentes. Berlin, Mém. 1775 = Oeuvres 4, p. 149. — *Jacobi*, Anm. 16. — *O. Schlömilch*, Theorie d. Differenzen u. der Summen. Halle 1848. — *G. Boole*, A treatise on the calculus of finite differences. Lond. 1872; 1880. — *Markoff*, Anm. 16. (Teil II.)

24) Arithm. univers. ed. s'Gravesande; Lugd. 1732, p. 181.

Sind alle Koeff. a_i von $f(z)$ reell, und ist ein $z_i = x_i + iy_i$ komplex, so folgt aus $f(x_i + iy_i) = 0$ auch $f(x_i - iy_i) = 0$.²⁵⁾ Daher gehört zu jeder μ_i -fachen W. $(x_i + iy_i)$ von $f = 0$ eine μ_i -fache W. $(x_i - iy_i)$; zu jedem Faktor $(z - x_i - iy_i)^{\mu_i}$ von $f(z)$ der konjugiert komplexe $(z - x_i + iy_i)^{\mu_i}$. — Jede gz. F. einer W. z_i kann so umgeformt werden, dass sie höchstens bis zum Grade $(n - 1)$ aufsteigt.

6. Ableitung und Stetigkeit. Entwickelt man $f(z + h)$ nach Potenzen von h und schreibt

$$f(z + h) = f(z) + hf'(z) + \frac{h^2}{1 \cdot 2} f''(z) + \dots + \frac{h^n}{n!} f^{(n)}(z),$$

dann heisst $f^{(\lambda)}(z)$ die λ^{te} Ableitung von $f(z)$ (vgl. II A 2). Die μ^{te} Ableitung der ν^{ten} Ableitung ist die $(\mu + \nu)^{\text{te}}$ Ableitung.

Aus dieser Darstellung fliesst der Satz, dass $f(z)$ eine stetige F. (II A 1, Nr. 9) von z ist, d. h. dass $|f(z + h) - f(z)|$ mit $|h|$ zur Null konvergiert. Dabei bedeutet nach C. Weierstrass $|a|$ den absoluten Betrag oder den Modul von a . Sowohl bei reellen wie bei komplexen Werten von h entscheidet das Verhalten von $f'(z)$ über den Sinn der Änderung von $f(z)$.²⁶⁾

Bei einer Anzahl algebraischer Beweise wird folgende Stetigkeitseigenschaft benutzt: Setzt man $z = x + yi$, $f(z) = u + vi$, dann lässt sich stets, wenn $|f(z)| = \sqrt{u^2 + v^2}$ von Null verschieden ist, ein Paar hinlänglich kleiner reeller Werte h, k so bestimmen, dass

$$|f(x + h + iy + ik)| < |f(x + iy)|$$

wird²⁷⁾.

7. Fundamentaltheorem der Algebra. Handelt es sich um die Frage, ob die allgemeine Gl. $f(z) = 0$ W. besitzt, so reicht es aus, die Koeff. reell anzunehmen; denn bei komplexen Koeff. braucht man nur $f(z)$ mit der konjugiert komplexen F. $f_1(z)$ zu multiplizieren und die Gl. mit reellen Koeff. $f(z)f_1(z) = 0$ zu betrachten.

Unter der Annahme reeller Koeff. folgt aus Stetigkeitsbetrachtungen (II A 1, Nr. 9), dass jede Gl. ungeraden Grades stets eine reelle W. besitzt; ebenso, dass jede Gl. geraden Grades, in welcher das Produkt $a_0 a_n$ negativ ist, eine positive und eine negative reelle W. hat²⁸⁾.

Besitzt jede Gl. eine W., dann folgt aus Nr. 3, dass eine jede

25) Euler, Introductio etc. Cap. 2.

26) Siehe z. B. Serret-Wertheim, Algebra, 2. Aufl. 1, § 51–52.

27) A. M. Legendre, Théorie des nombres, 2. éd. Paris 1808, p. 149.

28) Euler, Introduct. Cap. 2; ebenda finden sich weitere elementare Eigenschaften von Funktionen zusammengestellt.

Gl. n^{ten} Grades genau n W., reelle oder gewöhnliche komplexe Zahlen habe, wenn jede W. so oft gezählt wird, als ihre Multiplizität angiebt. Der Satz, dass dies wirklich der Fall ist, heisst nach *Gauss* das *algebraische Fundamentaltheorem*.

Die Existenz einer W. für jede algebraische Gl. schlossen die Mathematiker des vorigen Jahrhunderts zunächst aus der Betrachtung besonderer Gl., z. B. der binomischen, ferner derjenigen von ungeradem Grade und derjenigen von geradem Grade mit $\text{sgn}(a_0 a_n) = -1$. Der Nachweis im allgemeinen Falle kostete grosse Mühe; *J. d'Alembert*, *Euler*, *Daviet de Foncenex*, *Lagrange* versuchten vergeblich ihn zu liefern. Der erste, strengeren Anforderungen genügende Beweis des Fundamentaltheorems wurde im Jahre 1797 von *C. F. Gauss* gefunden und 1799 in seiner Dissertation²⁹⁾ unter Vermeidung der Benutzung komplexer Grössen veröffentlicht. Ebenda (Werke 3, p. 7—20) befindet sich eine eingehende Besprechung der früheren ernsthaften Versuche einer Begründung des Fundamentaltheorems. *Gauss* hat in der Folge noch drei andere Beweise des Satzes gegeben³⁰⁾. Jetzt liegen so viele Beweise vor, dass eine Aufzählung nicht möglich ist; wir müssen uns darauf beschränken, die gelieferten zu gruppieren und die Gruppen zu charakterisieren. Dabei sehen wir von solchen Beweisen ab, welche sich auf Lehren der Integralrechnung oder der Funktionentheorie stützen³¹⁾.

Hat $f(z) = 0$ nicht zufällig eine rationale W. (vgl. Nr. 10, *Newton*), dann ist es nicht möglich, eine W. der Gl. durch eine endliche Anzahl von rationalen Operationen darzustellen; ebensowenig gelingt es, die Existenz der W. ohne Benutzung von Stetigkeitsbetrachtungen (analytischer oder geometrischer Natur) oder von unendlich fortgesetzten Operationen nachzuweisen.

Die eine Gruppe von Beweisen wendet derartige Hilfsmittel an. Bei ihrer Beurteilung ist der Standpunkt, den man gegenüber der Auffassung der geometrischen Stetigkeit und des Irrationalen einnimmt, von entscheidender Bedeutung. Solange ohne Bedenken jeder Strecke

29) Helmstädt 1799 = Werke 3, p. 1: „Demonstratio nova theorematis omnem functionem algebraicam rationalem integrum unius variabilis in factores reales primi vel secundi ordinis resolvi posse.“ Über die früheren Beweisversuche vgl. *G. Loria*, Riv. di mat. 1 (1891), p. 185, Bibl. math. (2) 5 (1891) p. 99.

30) Comment. Götting. 3, 1816; (1815, 7. Dez. und 1816, 30. Jan.). — Götting. Abh. 4, 1850. Der vierte Beweis kann als eine Neuredaktion des ersten unter Benutzung der komplexen Grössen angesehen werden; er weist zugleich die Existenz aller n W. der Gl. gleichzeitig nach.

31) Hierher gehört der dritte *Gauss'sche* Beweis, einer der *Cauchy'schen* Beweise u. s. f.

eine entsprechende Zahl zugeordnet wurde (vgl. I A 3, Nr. 4), galten die geometrischen Beweise als bindend. Mit der Erkenntnis, dass solche Zuordnung ein geometrisches Axiom involviere, änderte sich diese Meinung. — Ebenso steht es bei den Beweisen, die sich auf eine explizit-ausführbare Annäherung an den „Wurzelwert“ stützen, gegenüber der Auffassung des Irrationalen. Einen extremen Standpunkt nahm in dieser Hinsicht *Kronecker* (J. f. Math. 101 [1887], p. 337) ein, der die „sogenannte Existenz der reellen irrationalen Wurzeln algebraischer Gleichungen einzig und allein in der Existenz von Intervallen sieht“, die beliebig geringe Ausdehnung haben, an deren Anfangs- und End-Punkt $f(z)$ entgegengesetzte Vorzeichen besitzt, und innerhalb deren $|f(z)|$ gewisse obere Grenzen nicht überschreitet. — Entsprechend definiert *F. Mertens*, Monatsh. f. Math. 3 (1892), p. 293: die W.-Existenz beweisen, heisse, eine Methode zur Bestimmung eines rationalen komplexen Wertes für z geben, durch den beide „Koordinaten“ der $F. f(z)$ von gewünschter Kleinheit würden. — *D. Hilbert* dagegen nennt diese Definition geradezu inkorrekt, Fortschr. d. Math. 24 (1895), p. 87.

Die andere Gruppe bedient sich solcher Hilfsmittel nicht und reduziert daher das Problem nur so weit, als es bei dieser Einschränkung geschehen kann: es wird gezeigt, dass jede Gl. dann eine W. besitzt, wenn dies für jede Gl. ungeraden Grades der Fall ist. So wird der arithmetische Teil scharf vom „transcendenten“ getrennt, wie *Gordan* sich treffend ausdrückt³²⁾.

Die Beweise der ersten Gruppe können in solche unterschieden werden, welche geometrische Stetigkeit benutzen und in solche, welche ein Verfahren angeben, durch das man sich einem W.-Werte asymptotisch nähert.

Zu den charakteristischen geometrischen Beweisen zählen vor allem der erste bzw. der vierte *Gauss'sche*. Ihr Prinzip beruht darauf, $f(x + iy) = u + iv$ zu setzen, (x, y) als Punkt der komplexen (*Gauss'schen*) Ebene zu deuten und dann zu zeigen, dass die Kurven $u(x, y) = 0$, $v(x, y) = 0$ Schnittpunkte haben. Dies folgt aus ihrer für grosse Moduln $\sqrt{x^2 + y^2}$ leicht zu überblickenden Konfiguration³³⁾. Andere Beweise stützen sich auf die Umschlingung des Nullpunktes durch die Kurve (u, v) in einer zweiten imaginären Ebene, wenn

32) Vorles. über Invariantentheorie 1, herausgeg. v. *Kerschensteiner*, Leipzig 1885, p. 166.

33) Vgl. dazu *Kronecker*, Berl. Ber. 1878, p. 151, 152, welcher als Kernpunkt den Übergang zu „reinen“ oder „binomischen“ Gl. heraushebt.

(x, y) in der seinigen eine passend gewählte geschlossene Kurve durchläuft³⁴⁾.

Der erste Beweis von *Cauchy*³⁵⁾, der sich im wesentlichen auf eine von *Legendre*³⁶⁾ herrührende Idee stützt, benutzt die Gestaltung der Fläche $w = u^2(x, y) + v^2(x, y)$, wobei x, y, w rechtwinklige Raumkoordinaten bedeuten, setzt die (als selbstverständliche Annahme angreifbare) Existenz eines Minimums für das niemals negative w voraus und weist mit Hilfe des Satzes in Nr. 6 nach, dass dieses Minimum nicht von 0 verschieden sein kann; so wird für das entsprechende (x, y) gefunden $u = 0, v = 0$, d. h. $f = u + iv = 0$.

Der zweite *Cauchy*'sche Beweis³⁷⁾ bringt ein eigenartiges Element in die Betrachtung, nämlich das Verhalten des Quotienten $u : v$ beim Umkreisen eines W.-Punktes: „Verfolgt man die Wertänderung des Quotienten $u : v$ beim Durchlaufen einer einfachen geschlossenen Kurve der xy -Ebene, indem man dabei ihr Inneres zur Linken lässt, dann geht der Quotient so oft vom Positiven durch Null zum Negativen, als die doppelte Anzahl der im Innern der Kurve liegenden W.-Stellen beträgt.“ Von diesem allgemeinen Satze kommt *Cauchy* dann auf das Fundamentaltheorem durch Betrachtung eines hinlänglich grossen (*Gauss*'schen) Kreises an Stelle der geschlossenen Kurve.

Die zweite Unterabteilung der Beweise erster Gruppe giebt analytische Vorschriften zur Annäherung an einen Wert z_1 , für den $f(z)$ verschwindet. Eine Reihe von Beweisen der ersten Unterabteilung lässt sich bei geänderter Darstellung direkt in diese Form bringen.

Der *d'Alembert*'sche Beweis³⁸⁾, der erste, welcher für das Fundamentaltheorem versucht wurde, gehört hierher; er beruht auf der analytischen Umkehrung der F. $y = f(z)$. *Gauss*, der ihn in einigen Punkten als unzureichend nachweist, giebt zugleich an, wie er zu voller Strenge umgestaltet werden könne³⁹⁾.

34) Vgl. z. B. *C. Ulherr*, J. f. Math. 31 (1846), p. 231.

35) Exerc. de Math. 4, Paris 1829, p. 98. — Vgl. Cours d'Analyse, Chap. X. Siehe auch *J. R. Argand*, Gergonne Ann. 5 (1815), p. 201. Wegen der Existenz des Minimums vgl. z. B. *Weber* I, § 41.

36) Théorie des nombres, Paris 1808, p. 149 ff.

37) J. Éc. polyt. Cah. 25 (1837), p. 176. — Vgl. *Ch. Sturm* u. *J. Liouville*, J. de Math. 1 (1836), p. 278 u. p. 290. *F. N. M. Moigno*, ibid. 5 (1840), p. 75. Auf eine Lücke in diesem Beweise hat *F. Rudio*, Naturf.-Ges. Zürich 38 (1894) aufmerksam gemacht; es wird nämlich die Zerlegbarkeit der Ebene in Teilgebiete von bestimmter Eigenschaft unbewiesen angenommen.

38) Berlin Hist. de l'Acad. 1746, p. 182.

39) l. c. Werke 3, p. 29. — Vgl. *Ch. v. Staudt*, J. f. Math. 29 (1845), p. 97.

In rein analytischer Form giebt *R. Lipschitz* einen Beweis⁴⁰⁾, der sich auf das Schlusstheorem von Nr. 6 stützt.

Zwei in ihrem Gedankengange ähnliche, aber in ihrer Durchführung von einander völlig verschiedene Beweise sind die von *F. Mertens*⁴¹⁾ und von *C. Weierstrass*⁴²⁾; beide benutzen die *Newton'sche* Näherungsformel als Algorithmus, vgl. I B 3a.

Unter den Beweisen der zweiten Gruppe ist zunächst der zweite *Gauss'sche* Beweis zu nennen⁴³⁾. Hier wird ein systematisch wichtiges Hilfsmittel benutzt: Eine Reihe von Eigenschaften einer Gl. n^{ten} Grades mit n W. $g(z) = 0$ lässt sich durch Relationen ausdrücken, welche selbst in den W. symmetrisch und also durch die Koeff. von $g(z)$ rational darstellbar sind; diese Koeff. darf man nun durch die entsprechenden Koeff. einer Gl. $f(z) = 0$, über deren W.-Existenz nichts bekannt ist, ersetzen und kann aus dem Bestehen der Relationen auf die jener Eigenschaften auch bei f schliessen⁴⁴⁾. Eine Umgestaltung des Beweises rührt von *Kronecker* her⁴⁵⁾. Beide Beweise zeigen, wie unter der Voraussetzung von W. jeder Gl. des Grades $2^\mu \cdot \nu$ (ν ungerade) die Existenz von W. der Gl. des Gr. $2^{\mu+1} \cdot \nu_1$ (ν_1 ungerade) folgt. Nach *Gordan* (Anm. 32) heisst μ der „Grad der Auflösbarkeit“.

Auf andere, einfachere Art führt *Gordan*⁴⁶⁾ den Existenzbeweis, indem er Resultanteneigenschaften benutzt (vgl. Nr. 18).

Eine neue Darstellung giebt *E. Phragmen*⁴⁷⁾ dem Beweise dadurch, dass er eine algebraische Kongruenz (vgl. Nr. 15) herleitet,

$$f(z) \equiv F(w, r)z + G(w, r) \quad \text{mod. } (z^2 - 2wz + r^2),$$

bei der $r = \varrho$ durch eine Gl. mit vermindertem Auflösbarkeitsgrade so bestimmt wird, dass $F(w, \varrho) = 0$, $G(w, \varrho) = 0$ eine gemeinsame W. $w = \omega$ besitzen; demnach ist $f(z)$ durch $z^2 - 2\omega z + \varrho^2$ teilbar.

Vgl. hierzu auch die von *Kronecker* aufgestellten Kongruenzen (Nr. 15), welche zur Zerlegung von $f(z)$ in Linearfaktoren führen.

40) Lehrbuch d. Analysis, Bonn 1877, 1, § 61. — Eine nach *Dedekind* und *G. Frobenius* vereinfachte Darstellung findet sich in *Weber's Algebra* 1, § 42, p. 143.

41) Wien. Abh. 1888 Dez. Abt. II^a. — Monatsh. f. Math. 3 (1892), p. 291.

42) Berl. Ber. 1891, p. 1085. — Vgl. auch *Ch. Méray*, Bull. d. scienc. math. (2) 15 (1891), p. 236.

43) Werke 3, p. 31.

44) Ausführlich dargestellt bei *J. Molk*, Acta math. 6 (1885), p. 1. — Zu dieser Gruppe gehört der Beweis von *Th. Vahlen*, Acta math. 21 (1897), p. 287.

45) Grundzüge einer arithm. Theorie u. s. w., J. f. Math. 92 (1882), § 13.

46) Math. Ann. 10 (1876), p. 572; Invariantentheorie 1, p. 166. — Vgl. auch *E. B. Elliott*, Lond. Math. Soc. Proc. 25 (1894), p. 173.

47) Stockholm Öfv. 16 (1891), p. 113. — Siehe ferner *D. Selivanoff*, Bull. Soc. Math. de France 13 (1885), p. 119.

8. Zerlegung in Faktoren. Durch den Nachweis der W.-Existenz ist der Anschluss an Nr. 5 gewonnen; damit ist der Satz bewiesen, dass jede gz. F. n^{ten} Grades sich, abgesehen von a_0 , in lineare Faktoren

$$f(z) = a_0(z - z_1)(z - z_2) \cdots (z - z_n) \\ = a_0(z - z_1)^{\mu_1}(z - z_2)^{\mu_2} \cdots (z - z_r)^{\mu_r} \quad (\mu_1 + \mu_2 + \cdots + \mu_r = n)$$

zerlegen lässt. Wir setzen $a_0 = 1$. Multipliziert man die erste Form aus und vergleicht die Koeff. gleicher Potenzen von z , so folgt

$$\sum z_\lambda = -a_1, \quad \sum z_\lambda z_\mu = +a_2, \quad \sum z_\lambda z_\mu z_\nu = -a_3, \dots$$

d. h. es ergeben sich fundamentale Beziehungen zwischen den Koeff. und den symmetrischen F. der W. Auf diese wird in der Theorie der symmetrischen Funktionen IB 3 b eingegangen; wir brauchen hier nur den Satz, dass jede gz. symmetrische F. der W. eine gz. F. der a_λ ist. Er zeigt z. B. sofort, dass jede rat. F. aller W. z_λ als gz. F. derselben darstellbar ist, die in den a_λ gebr. Koeff. haben.

Setzt man $f_\lambda = (z - z_\lambda)(z - z_{\lambda+1}) \cdots (z - z_n)$ für $\lambda = 1, 2, \dots, n-1, n$, so folgt, dass jede W.-Potenz z_λ^κ , in der $\kappa > (n - \lambda)$ ist, eine gze. gz.-zahlige F. von z_λ, \dots, z_n wird, die in z_λ nur bis zur Potenz $(n - \lambda)$ steigt. Das ergibt weiter, dass gze. gz.-zahlige F. der W. sich gz. und gz.-zahlig als Aggregate der $n!$ Potenzprodukte

$$z_1^{h_1} z_2^{h_2} \cdots z_{n-1}^{h_{n-1}} \quad (h_k = 0, 1, \dots, n - k; k = 1, 2, \dots, n - 1)$$

darstellen lassen, wobei die Koeff. gze. gz.-zahlige F. von a_1, a_2, \dots, a_n sind⁴⁸⁾. Ein solches System heisst ein *Fundamentalsystem*.

9. Rationalitätsbereich. Bei allen Fragen nach Zerlegbarkeit und Unzerlegbarkeit eines Ausdrucks ist zunächst festzustellen, was als rational bekannt gelten soll. Da mit jeder rational bekannten Grösse zugleich auch alle ihre rationalen F. rational bekannt sind, so genügt es, die Elemente $\mathfrak{R}', \mathfrak{R}'', \mathfrak{R}''', \dots$ anzugeben, deren rationale F. den *Rationalitätsbereich* ($\mathfrak{R}', \mathfrak{R}'', \mathfrak{R}''', \dots$) ausmachen. Die rat. F. sind dabei stets mit gz. gz.-zahligen Koeff. zu bilden⁴⁹⁾.

Eine gz. F. kann in einem Rationalitätsbereiche (Rat.-Ber.) unzerlegbar, irreduktibel (irred.) sein, während sie in einem erweiterten zerlegbar, reduktibel (red.) ist. Im Bereiche der reellen Zahlen ist nach dem Fundamentaltheorem jede gz. gz.-zahlige F. $f(z)$ in Faktoren ersten oder zweiten Grades, im Bereiche der komplexen Zahlen in Faktoren

48) Kronecker, l. c. § 12.

49) Abel hat zuerst die Notwendigkeit dieser Festsetzungen erkannt: „Sur la résol. algèbr. etc.“, Oeuvres (éd. Sylow u. Lie) 2, p. 217. Die weitere Ausbildung stammt von Kronecker, Berl. Ber. 1853, p. 365; 1873, p. 117; 1879, p. 205; Grundzüge u. s. w. 1882, p. 3.

ersten Grades zerlegbar. *Gauss* hat gezeigt⁵⁰⁾, dass für Zerlegungen *gz. gz.-zahliger F.* $f(z)$ der Rat.-Ber. der rat. gebrochenen Zahlen sich durch den der rat. *gz. Zahlen* ersetzen lässt; mit anderen Worten, dass das Produkt zweier primitiver *F.* wieder eine primitive *F.* wird.

10. Reduktibilität. Irreduktibilität. Die Frage, ob eine *gz. gz.-zahlige F.* $f(z)$ im „natürlichen“ Rat.-Ber. ($\mathfrak{R}' = (1)$) zerlegbar ist, kann so entschieden werden, dass man alle *W.-Faktoren* ($z - z_i$) bestimmt und einzeln betrachtet, oder zu je zwei, drei, ... multipliziert; Zerlegung findet dann und nur dann statt, wenn dabei eins der Produkte eine *gz. gz.-zahlige F.* wird. — Die direkte Behandlung der Frage führt auf Eliminationsprobleme und wandelt sie in die andere um, ob gewisse *Gl. gz. gz.-zahlige W.* haben⁵¹⁾. Beide Methoden sind praktisch nicht verwendbar. — Nimmt man die *W.-Existenz* als bewiesen an, dann lässt sich eine Grenze für den absoluten Betrag der Moduln der Koeff. der Faktoren aus den absoluten Beträgen der Koeff. von $f(z)$ herleiten⁵²⁾. Damit kann man die Frage durch eine endliche Anzahl von Versuchen bequemer erledigen.

Ohne Voraussetzung des Fundamentaltheorems, welches er aus Gründen der Systematik an eine spätere Stelle setzt, gelangt *Kronecker* zur Lösung des Problems, indem er mit Hülfe der *Lagrange'schen* Interpolationsformel alle *F.* aufstellt, die überhaupt als Teiler von $f(z)$ in Frage kommen⁵³⁾. Diese Methode ist von *Runge* weiter durchgearbeitet und zu praktischem Gebrauche verwendbar gemacht worden⁵⁴⁾.

*M. Mandl*⁵⁵⁾ ersetzt das *Heine'sche* Eliminationsverfahren (Anm. 51) durch die Lösung einer Reihe diophantischer Gleichungen.

Schon *Newton* hat den Fall linearer Faktoren erledigt⁵⁶⁾, derart dass er für eine Reihe von Argumentwerten die Glieder einer arithmetischen Reihe annimmt; er hat auch die Erweiterung auf Faktoren höherer Ordnung angedeutet; hierbei tritt eine nahe Verwandtschaft der *Kronecker'schen* mit der *Newton'schen* Methode zu Tage.

G. Eisenstein hat einen Satz aufgestellt⁵⁷⁾, durch welchen aus der formalen Beschaffenheit der Koeff. einer *F.* ein Schluss auf ihre Irred.

50) Disq. arithm. Lips. 1801, § 42 = Werke 1, p. 34. Vgl. ibid. § 11.

51) *E. Heine*, J. f. Math. 48 (1854), p. 267.

52) *K. Runge*, J. f. Math. 99 (1886), p. 93, 94; vgl. I B 3a, Nr. 2.

53) Grundzüge u. s. w. § 4, p. 11.

54) J. f. Math. 99 (1886), p. 89.

55) J. f. Math. 113 (1894), p. 252.

56) Arithmetica universalis, Lugd. 1732.

57) J. f. Math. 39 (1850), p. 160.

gezogen werden kann: sind bei $a_0 = 1$ alle Koeff. a_1, a_2, \dots, a_n durch die Primzahl p , und ist a_n durch keine höhere Potenz von p als die erste teilbar, dann ist f irreduktibel. — *L. Königsberger*⁵⁸⁾ hat eine Verallgemeinerung dieses Theorems durch eine ganze Reihe von Sätzen gegeben; an diese schliessen sich andere in derselben Richtung an, die *Netto* fand⁵⁹⁾.

Der *Eisenstein'sche* Satz liefert einen unmittelbaren Beweis für die Irred. der „Kreisteilungsgl.“ $z^{p-1} + z^{p-2} + \dots + z + 1 = 0$ für eine Primzahl p und ebenso für eine Primzahlpotenz (l. c.). Der erste Beweis für die Irreduktibilität der Kreisteilungsgl. stammt von *Gauss* (Disq. arith. Sect. VII, § 341); in der Folgezeit wurde eine ganze Anzahl weiterer Beweise gegeben⁶⁰⁾. — Ein einfacher Beweis für die Irreduktibilität von $z^p - a$, falls a keine p^{te} Potenz ist (*Abel*: Sur la résol. alg. § 2), stammt von *Mertens*, und ein rein arithmetischer Beweis von *A. Kneser*⁶¹⁾.

Die Behandlung der Reduktibilität in einem willkürlichen Rat.-Ber. fordert genaues Eingehen auf die Theorie der Elimination und der algebraischen Grössen. Man findet eine grundlegende Untersuchung bei *Kronecker* („Grundzüge“) und Erläuterungen dazu bei *Molk* (l. c.) und bei *A. Kneser*, Math. Ann. 30 (1887), p. 179, § 3. Die Irreduktibilität der Kreisteilungsgl. in allgemeineren Rat.-Gebieten findet sich in den, Anm. 60 zitierten Arbeiten gleichfalls behandelt.

Über die Irreduktibilität von Funktionen $f(z) = \theta_1(\theta_2(z))$ hat *A. Capelli* Untersuchungen angestellt⁶²⁾. Dabei gehören die Koeffizienten der Funktionen $\theta_1(y)$, $\theta_2(z)$ einem beliebigen Rationalitätsgebiete (\mathfrak{R}) an. Für die Irreduktibilität von f ist es charakteristisch, dass $\theta_1(y)$ in (\mathfrak{R}) und $\theta_2(z) - y_1$ in (\mathfrak{R}, y_1) irreduktibel ist; y_1 bedeutet hier eine Wurzel von $\theta_1(y) = 0$.

Mit Hülfe dieses allgemeinen Satzes erledigt *Capelli* die Frage nach der Irreduktibilität der binomischen Gleichung $z^n - a = 0$ für beliebige Rationalitätsbereiche. Die Potenzen von 2, für n genommen, treten bei den Resultaten in eine Ausnahmestellung.

58) J. f. Math. 115 (1895), p. 53 und weiter Berl. Ber. 1898, p. 735.

59) Algebra 1, p. 61.

60) *Kronecker*, J. f. Math. 29 (1845), p. 280; J. de Math. 19 (1845), p. 177; *ibid.* (2) 1 (1856), p. 399 [= Werke 1, p. 1, 75, 99]; J. f. Math. 100 (1887), p. 79. *Serret*, J. de Math. 15 (1850), p. 296. *Th. Schönemann*, J. f. Math. 32 (1846), p. 93. *Dedekind*, *ibid.* 54 (1857), p. 27. *F. Arndt*, *ibid.* 56 (1859), p. 178. *V.-A. Lebesgue*, J. de Math. (2) 4 (1859), p. 105.

61) *F. Mertens*, Monatsh. f. Math. 2 (1891), p. 291; *A. Kneser*, J. f. Math. 106 (1890), p. 48.

62) Napoli Rend. (1897, Dez.; 1898, Febr., Mai).

11. Teilbarkeitseigenschaften. Den Irreduktibilitäts- können *Teilbarkeits*-Eigenschaften gegenübergestellt werden, bei denen es sich darum handelt, dass gewisse F. durch andere geteilt werden können. Bei Umformungen in der Determinantentheorie begegnet man häufig solchen Formeln. Hervorzuheben ist eine Arbeit von *W. Fr. Meyer*⁶³⁾ über die Teilbarkeit ganzer Funktionen höherer Differentialquotienten Δ_k , wo $k! \Delta_k$ den Zähler der k^{ten} Ableitung eines Bruches $g(z):f(z)$ bedeutet. Es mag hier angemerkt werden, dass alle Determinanten $|\Delta_{i+k}|$ sehr leicht als solche dargestellt werden können, deren Elemente Ableitungen der f, g sind, woraus allgemeinere Teilbarkeits-Eigenschaften entspringen. Ferner sei auf den Zusammenhang dieser Formeln mit den Entwicklungen der C_q gegen Ende von Nr. 12 hingewiesen.

Teilbarkeits-Eigenschaften sind ferner für Resultanten und Diskriminanten (Nr. 19) in grosser Anzahl entwickelt.

D. Hilbert giebt in eleganter Weise die charakteristischen Bedingungen dafür, dass eine binäre Form eine vollständige Potenz einer anderen binären Form sei; hier knüpft *C. Weltzien* an, leitet in den einfachsten Fällen diese Bedingungen elementar ab und erweitert die Untersuchung auf ternäre Formen⁶⁴⁾.

12. Grösster gemeinsamer Teiler. Sind $f(z)$ vom Grade n , und $f_1(z)$ vom Grade $(n - n_1)$ gz. gz.-zählige Funktionen, dann liefert das *Euklid'sche* Schema des *grössten gemeinsamen Teilers* (gr. gm. T.) eine endliche Reihe von Gleichungen [I B 3a]

$$f_{\lambda-1} = f_{\lambda} g_{\lambda} - f_{\lambda+1} \quad (\lambda = 1, 2, \dots r; f_0 = f),$$

in denen der Grad von $f_{\lambda+1}$ kleiner als der von f_{λ} ist, und $f_{r+1} = 0$ wird. Das Vorzeichen des Restes wird anderer Untersuchungen halber (*Sturm'sche* Reihe) negativ gewählt. Der Grad von f_{λ} sei $(n - n_{\lambda})$, so dass $n_{\lambda+1} > n_{\lambda}$ und $n_1 \geq 0$ wird. Jedes f_{λ} lässt sich in der Form

$$f_{\lambda} = f_1 \psi_{\lambda} - f \varphi_{\lambda}$$

darstellen, wobei ψ_{λ} und φ_{λ} bezw. die Grade n_{λ} und $(n - n_{\lambda})$ besitzen. Die Koeff. in den f_{λ} brauchen nicht ganzzahlig zu sein; durch Benutzung von Konstanten, mit denen vor der Division multipliziert wird, kann man ganzzahlige F. $\bar{f}_{\lambda}, \bar{g}_{\lambda}$ erhalten, so dass

$$r_{\lambda-1} \bar{f}_{\lambda-1} = \bar{f}_{\lambda} \bar{g}_{\lambda} - s_{\lambda+1} \bar{f}_{\lambda+1}$$

gesetzt wird, wo alle $\bar{f}_{\lambda+1}$ primitive F. werden. Die fremden

63) *Math. Ann.* 36 (1890), p. 435.

64) *Hilbert*, *Math. Ann.* 27 (1886), p. 381; vgl. *F. Brioschi*, *Pal. C. M. R.* 10 (1896), p. 153; *C. Weltzien*, *Progr. d. Friedr. Werd. Ober-Realsch.*, Berlin 1892.

durch $r_{\lambda-1}$ eingeführten Faktoren fallen durch $s_{\lambda+2}$ wieder heraus, indem $s_{\lambda+2}$ ein Multiplum von $r_{\lambda-1}$ wird⁶⁵). Wir wollen aber bei der ersten Darstellung mit gebrochenen Koeff. bleiben.

Das *Euklid'sche* Schema liefert die Kettenbruchentwicklung

$$\frac{f_1}{f} = 1/g_1 - 1/g_2 - \dots - 1/g_r$$

und ferner die Darstellung desselben Bruches als Summe von Primbrüchen

$$\frac{f_1}{f} = \frac{1}{\psi_0 \psi_1} + \frac{1}{\psi_1 \psi_2} + \dots + \frac{1}{\psi_{r-1} \psi_r};$$

das wichtigste Ergebnis des Verfahrens aber ist die Herstellung des gr. gm. T., der freilich mit gebrochenen Koeff. behaftet auftritt,

$$f_r = f_1 \psi_{r-1} - f \varphi_{r-1}.$$

Die Reihe der für die f_λ oben aufgestellten Gl. führt zu der Aufgabe, zwei gz. F. Ψ und Φ so zu bestimmen, dass wenn $f_1 \Psi - f \Phi = F$, und die Grade von Ψ , Φ , F gleich ν , $\nu - n_1$, ϱ werden, dann $\nu + \varrho < n$ ist, wie dies bei $\psi_{\lambda-1}$, $\varphi_{\lambda-1}$, f_λ der Fall war. Diese Aufgabe kann man durch Reihenentwicklung

$$\frac{f_1}{f} = c_0 z^{-1} + c_1 z^{-2} + c_2 z^{-2} + \dots$$

lösen; bezeichnen wir $|c_{p+q}|$ mit C_σ ($p, q = 0, 1, \dots, \sigma - 1$), so können eindeutige Lösungen nur für solche Gradzahlen von Ψ auftreten, welche gleichzeitig Ordnungszahlen nicht verschwindender C_σ sind. Durch das Verschwinden derartiger Determinanten wird zugleich der Grad des gr. gm. T. der Funktionen f, f_1 bestimmt. Die $f_\lambda, \psi_\lambda, \varphi_\lambda$ lassen sich durch ähnlich gebildete, mit den C_ϱ verwandte Determinanten darstellen. Die Umwandlung in Determinanten, deren Elemente die Koeff. von f und f_1 statt der c_λ sind, lässt sich auf verschiedene Weise durchführen⁶⁶).

Über die Darstellung des gr. gm. T. vgl. auch den Satzsatz von Nr. 18.

13. Irreduktible Funktionen. Haben f und f_1 keinen gem. T. ausser einer Konstanten, dann heissen sie *relativ prim* zu einander oder *teilerfremd*. Für solche kann

$$f \cdot F_1 + f_1 \cdot F = 1$$

gesetzt werden, wo F und F_1 passend gewählte gz. F. höchstens von den Graden $(n - n_1 - 1)$ und $(n - 1)$ mit gebrochenen Koeff. sind.

65) Netto, J. f. Math. 116 (1896), p. 45.

66) Vgl. zu dieser Nummer: Kronecker, Berl. Ber. 1881, p. 535. — Netto, Algebra 1, Vorles. 6 und 7.

Aus diesem fundamentalen Satze folgt⁶⁷⁾: Hat f mit einer irred. F. φ einen gem. T., so ist f selbst durch φ teilbar. — Wenn weder f_1 noch f_2 durch die irred. F. φ teilbar ist, dann wird auch $f_1 f_2$ nicht durch φ teilbar. — Ist $f_1 f_2$ durch ein f teilbar, welches keinen gem. T. mit f_2 hat, dann ist f_1 durch f teilbar. — Ist f ein Vielfaches von f_1 und von f_2 , und haben f_1 und f_2 keinen gem. T., dann ist f auch ein Vielfaches von $f_1 f_2$. — Jede F. lässt sich auf wesentlich nur eine Art, d. h. abgesehen von konstanten Faktoren, in ein Produkt von irred. Faktoren zerlegen. Hier treten Analogien zur Zahlentheorie heraus; die irredukt. Faktoren übernehmen die Rolle von Primzahlen und die Konstanten diejenige von Einheiten.

14. Trennung vielfacher Wurzeln. Aus der in Nr. 8 gegebenen Form von $f(z)$ folgt, wenn z_i die Multiplizität μ_i hat,

$$f'(z) = \sum \frac{\mu_i f(z)}{z - z_i} \quad (\lambda = 1, 2, \dots r),$$

und daraus ergibt sich, dass f und f' als gr. gm. T. das Produkt

$$f_1(z) = (z - z_1)^{\mu_1 - 1} (z - z_2)^{\mu_2 - 1} \dots (z - z_r)^{\mu_r - 1}$$

haben, d. h. das Produkt aller Wurzelfaktoren, jeden in einer um 1 verminderten Multiplizität gegenüber $f(z)$.

Verfahren wir ebenso mit f_1 und f'_1 , so wird deren gr. gm. T.:

$$f_2(z) = (z - z_1)^{\mu_1 - 2} (z - z_2)^{\mu_2 - 2} \dots (z - z_r)^{\mu_r - 2},$$

wo alle Faktoren mit negativen Exponenten zu unterdrücken sind; u. s. f. Es enthält $f(z): f_1(z) = 0$ alle W. von $f = 0$, und zwar eine jede einfach; $f_1(z): f_2(z) = 0$ alle W. von $f = 0$, die mindestens die Multiplizität 2 haben, und zwar eine jede einfach; u. s. w. Ferner liefern

$$\frac{f(z) f_2(z)}{f_1^2(z)} = 0, \quad \frac{f_1(z) f_3(z)}{f_2^2(z)} = 0, \dots$$

alle einfachen, alle Doppel-W., ... und zwar jede in der Multiplizität 1.⁶⁸⁾

Jede μ -fache W. von $f(z) = 0$ ist zugleich W. von $f'(z) = 0$, ... $f^{(\mu-1)}(z) = 0$ und umgekehrt⁶⁹⁾.

Setzen wir unter Wahrung der Bedeutung von f , f' und f_1

$$f(z) = f_1(z) \cdot g(z), \quad f'(z) = f_1(z) \cdot h(z),$$

67) Diese Analoga zu Sätzen der Zahlentheorie sind in jedem Lehrbuche der Algebra zu finden; vgl. auch *Molk* l. c.

68) Vgl. z. B. *Serret-Wertheim* Algebra, 2. Aufl., 1, § 50.

69) *J. Hudde*, Brief an *F. van Schooten* (Epist. II) in dessen Ausgabe von Descartes Geometrie, Amstelod. 1658. — *Euler*, Inst. Calc. Diff. 2, § 249.

so folgt, dass $g(z) = 0$ keine vielfachen W. habe, aus dem Fundamentalsatz. *Fr. Engel*⁷⁰⁾ hat ohne Voraussetzung desselben den gleichen Satz bewiesen, indem er von einer Bemerkung von *Gauss* ausging⁷¹⁾.

Ist eine gz. F. $f(z)$ so in Faktoren zerlegt, $f = M^m P^p \dots S^s$, dass die Gl. $M \cdot P \dots S = 0$ nur einfache W. besitzt, dann giebt es, wie *Ch. Hermite* gezeigt hat⁷²⁾, eine Zerlegung jedes Bruches

$$\frac{g(z)}{f(z)} = \frac{\mathfrak{M}}{M^m} + \frac{\mathfrak{P}}{P^p} + \dots + \frac{\mathfrak{S}}{S^s},$$

wobei die Zähler $\mathfrak{M}, \mathfrak{P}, \dots \mathfrak{S}$ rat. gz. Funktionen sind. Diese Darstellung, welche auf rationalem Wege durchgeführt werden kann, ist für die Integration des Bruches von Wichtigkeit. [II A 2.]

Bestehen unter den W. einer Gl. μ Relationen $z_\alpha = z_\beta$, dann nennt *J. J. Sylvester* (*Phil. Mag.* [4] 3 [1852], p. 375 u. 460) μ die *Multiplizität der Gl.*; diese kann je nach dem Zusammenhange der W. sehr verschiedenen Charakter haben. Für alle bestehen gewisse nur von μ abhängige (Evectanten-) Eigenschaften. (Über die Definition der Evectanten vgl. *G. Salmon*, *Higher Algebra* § 134, sowie IB 2.) Vgl. weiter Nr. 22.

15. Algebraische Kongruenzen. Ist

$$F(z) = f(z) + g(z) \cdot \varphi(z),$$

dann heissen $F(z)$ und $f(z)$, in Analogie zu Bezeichnungen der Zahlentheorie, einander kongruent nach dem Modul $g(z)$. Dies liefert die „*algebraische Kongruenz*“

$$F(z) \equiv f(z) \pmod{g(z)},$$

deren erste Behandlung von *Cauchy* stammt⁷³⁾, und deren weitere Erforschung durch Arbeiten von *J.-A. Serret*⁷⁴⁾, von *Th. Schönemann*⁷⁵⁾ und von *R. Dedekind*⁷⁶⁾ gegeben wurde. Sind alle auftretenden Zahlenkoeff. in F und g gz. Zahlen, dann kann man sie nach einem Zahlenmodul k betrachten. Demnach lassen sich auch alle ganzen, ganzzahligen Funktionen sowohl mod. $g(z)$ als auch mod. k , also nach dem *Doppelmodul* $(g(z); k)$ betrachten. $g(z)$ heisst dabei nach *Serret* die *Modularfunktion*. Man kann die Anzahl der Modularfunktionen eines vor-

70) *Leipz. Ber.* 49 (1897), p. 603.

71) *Demonstr. nova altera*, § 10, *Werke* 3, p. 44.

72) *Cours d'Analyse* 1 (1873), p. 265.

73) *Exerc. d'anal.* 3 (1844), p. 87.

74) *Serret*, *Paris Mém.* 35 (1866), p. 617 und *Algèbre* 2, Section 3.

75) *J. f. Math.* 31 (1846), p. 269.

76) *J. f. Math.* 54 (1857), p. 1.

geschriebenen Grades bei gegebenem Modul k bestimmen; ebenso die Anzahl der Reste $f(z)$, bei denen weder Grad noch Betrag der Koeff. mod. $(g(z); k)$ erniedrigt werden kann.

Die Fassung der Begriffe Irreduktibilität und Teilbarkeit, von Kongruenzwurzeln, u. s. w. ist klar. Bei den binomischen Kongruenzen

$$x^n - 1 \equiv 0 \quad \text{mod. } (g(z); k)$$

treten die Wurzeln, die zu gewissen Exponenten „gehören“, zusammen; dieser Begriff sowie derjenige der *primitiven* W. entspricht dem in der Zahlentheorie gebräuchlichen.

Auch in diesem Gebiete ist das Problem der Zerlegung einer gegebenen F. $F(z)$ in irred. Faktoren zu lösen⁷⁷⁾. —

Hier seien ferner die *Kronecker'schen*⁷⁸⁾ Untersuchungen erwähnt, durch welche zu jeder gz. F. von z ein Modul gefunden wird, für welchen sie in lineare Faktoren von z zerfällt werden kann. So ist z. B.

$$4 \cdot (9c)^3 (z^3 - c) \equiv (9cz - t^4)(18cz + 9ct + t^4)(18cz - 9ct + t^4) \quad \text{mod. } (t^6 + 27c^3).$$

16. Resultantendarstellung. Sind zwei Gl., $f(z) = 0$ vom Grade m mit den Koeff. a_0, \dots, a_m und den W. $\alpha_1, \dots, \alpha_m$, und $g(z) = 0$ vom Grade n mit den Koeff. b_0, \dots, b_n und den W. β_1, \dots, β_n gegeben, (wo $m \geq n$ sei), dann schliesst bei unbestimmten a, b die Kette des *Euklid'schen* Algorithmus mit einem konstanten aus den a, b gebildeten Bruche. Das Verschwinden seines Zählers giebt die Bedingungen für einen gm. T. von f und g . Nach *Brill-Noether*, Deutsche Math. Ver. 3 (1892—93), p. 134 stammt diese Methode von *J. P. de Gua*.

Die Frage nach diesem gm. T. wird auch durch die Betrachtung des Produkts (erste *Euler'sche* Methode)

$$R(f, g) = a_0^m b_0^n \prod (\alpha_\lambda - \beta_\lambda) \quad (\lambda = 1, 2, \dots, m; \lambda = 1, 2, \dots, n)$$

erledigt; der Faktor vor dem \prod bewirkt, dass die symmetrische F. R sich als gz. F. der a, b ausdrücken lässt.⁷⁹⁾ Es ist

$$R(f, g) = a_0^n g(\alpha_1) \dots g(\alpha_m) = (-1)^{mn} b_0^m f(\beta_1) \dots f(\beta_n) = (-1)^{mn} R(g, f).$$

$R = 0$ liefert die charakteristische Bedingung für einen gm. T.

R heisst die *Resultante* ($R.$) von f und g .⁸⁰⁾ *Euler* gab eine Me-

77) In engem Zusammenhange hiermit steht die Theorie der *Galois'schen* imaginären Wurzeln. Vgl. Bull. Férussac 13 (1830), p. 428 = J. de Math. 11 (1846), p. 399 = Oeuvres publ. p. *É. Picard*, Paris 1897, p. 15. [I C 1].

78) Mathesis, Mai 1885, p. 102; J. f. Math. 100 (1887), p. 490.

79) *Euler*, Berl. Hist. 1748, p. 243. — *G. Cramer*, Introduct. à l'Analyse des lignes courbes etc. Genf 1750.

80) *Newton*, Arithm. univers 1. Über d. Elimination; *Bézout*, Paris Mém. 1764, p. 286. — Von englischen Mathematikern wird auch die Bezeichnung Eliminate gebraucht. Vgl. über diese Nomenklatur IB 1 b, Nr. 13 u. 14.

thode⁸¹⁾, die Berechnung von R bei $n = m$ auf das gleiche Problem für $(m - 1)$ zu reduzieren; *Bézout* erweiterte sie⁸²⁾ und führte die Aufgabe auf ein Eliminationsproblem für lineare Gleichungen zurück, indem er (*Bézout'sche Methode*)

$$\varphi_\alpha = a_0 z^\alpha + a_1 z^{\alpha-1} + \dots + a_\alpha, \quad \psi_\alpha = b_0 z^\alpha + b_1 z^{\alpha-1} + \dots + b_\alpha, \\ \psi_\alpha f - \varphi_\alpha g = d_{\alpha 1} z^{m-1} + d_{\alpha 2} z^{m-2} + \dots + d_{\alpha m} = 0 \quad (\alpha = 0, 1, \dots, m-1)$$

setzte und aus dem letzten Gl.-Systeme die Potenzen $1, z, z^2, \dots, z^{m-1}$ eliminierte⁸³⁾. *Jacobi* hat diese Methode durchgearbeitet⁸⁴⁾ und zuerst das Verschwinden der Determinante $S = |d_{\mu\nu}|$ als die Bedingung eines gm. T. angegeben⁸⁵⁾. *Rosenhain*⁸⁶⁾ erweitert die Methode auf den Fall $m > n$; *Cayley*⁸⁷⁾ kommt durch die Betrachtung der Koeff. von $\xi^{m-1}, \xi^{m-2}, \dots, 1$ in

$$[f(z)g(\xi) - f(\xi)g(z)]: (z - \xi)$$

zu denselben $\psi_\alpha f - \varphi_\alpha g$ wie *Bézout*.

Die Elemente der Determinante $S = |d_{\mu\nu}|$ sind noch F. der Koeff. *O. Hesse*⁸⁸⁾ hat zuerst die Bedingung in die Form einer verschwindenden Det. gebracht, deren Elemente die Koeff. selbst sind. Die einfachste Herleitung dieses Resultates wurde von *Sylvester*⁸⁹⁾ mittels seiner „dialytischen“ Methode geliefert: Multipliziert man $f = 0$ und $g = 0$ mit $1, z, z^2, \dots, z^{n-1}$ bzw. $1, z, z^2, \dots, z^{m-1}$, so entstehen $(n + m)$ lineare Gl. mit den $(n + m - 1)$ Unbekannten z, z^2, \dots, z^{m+n-1} ; ihre Elimination aus diesen Gl. ergibt die Determinante

$$T = \begin{vmatrix} a_x & a_{x+1} & \dots & a_{x+m+n-1} \\ b_\lambda & b_{\lambda+1} & \dots & b_{\lambda+m+n-1} \end{vmatrix} \quad \begin{matrix} (x = 0, -1, \dots, -n+1) \\ (\lambda = 0, -1, \dots, -m+1) \end{matrix}$$

(alle a_x, b_λ , deren Indices negativ oder grösser als m bez. n werden, sind 0). Es lässt sich zeigen, dass $T = 0$ auch hinreichende Bedingung für einen gm. T. ist. *Hesse* hat⁹⁰⁾ die Übereinstimmung von

81) *Introd. in Anal. Inf.* 2; § 474 ff. — *Berlin Hist.* 1764, p. 96.

82) *Bézout*, l. c. Anm. 80.

83) *Euler* benutzt zu seiner Reduktion nur die Gl. mit $\alpha = 0$ und $\alpha = m - 1$ (sogen.: „Zweite *Euler'sche Methode*“); diese findet sich übrigens bereits in der *Arithm. univers.* von *Newton* dargelegt.

84) *J. f. Math.* 15 (1836), p. 101 = *Werke* 3, p. 295.

85) Von *Sylvester*, *Phil. Trans.* 143 (1853), p. 407 als *Bézoutiante* bezeichnet.

86) *J. f. Math.* 28 (1844), p. 268.

87) *J. f. Math.* 53 (1857), p. 366 = *Pap.* 4, p. 38; dazu Zeichenerläuterungen v. *Borchardt* *ib.* p. 367. Vgl. auch *Borchardt*, *J. f. Math.* 57 (1860), p. 111, 183 = *Werke* p. 391.

88) *J. f. Math.* 27 (1844), p. 1 = *Werke*, p. 83.

89) *Phil. Mag.* 1840, Nr. 101; wesentlich nur eine andere Darstellung der Methode von *F. J. Richelot*, *J. f. Math.* 21 (1840), p. 226 und *Hesse*, l. c. Anm. 88.

90) *Kritische Zeitschr. f. Math.* (1858), p. 483 = *Werke*, p. 475; auf andere Weise *Borchardt*, *J. f. Math.* 57 (1860), p. 183 = *Werke*, p. 145.

$R(f, g)$ und T direkt nachgewiesen; ferner *Baltzer*⁹¹⁾ die Gleichung $S = (-1)^{\frac{1}{2}n(n-1)} T$ (bei $m = n$).

W. Stahl liefert für $n = m$ eine Determinante, welche nur von der Ordnung $(m - 1)$ ist⁹²⁾.

Die erste *Euler'sche* Darstellung benutzt die Werte α und β , für welche die F. f bez. g verschwinden; *G. Rosenhain* löst das allgemeinere Problem, die Resultante aus den Werten $f(\gamma_1), \dots, f(\gamma_{m+n}); g(\gamma_1), \dots, g(\gamma_{m+n})$ darzustellen, welche beide F. für willkürliche Argumente $\gamma_1, \dots, \gamma_{m+n}$ annehmen⁹³⁾. Mit Hülfe seines Resultats kann man die *Cauchy'sche* Interpolationsformel herleiten. Diese „interpolatorische“ Darstellung wurde von *Borchardt* folgendermassen modifiziert⁹⁴⁾: bei *Rosenhain* sind die Werte $f(\gamma_1), \dots, f(\gamma_{m+n})$ und ebenso $g(\gamma_1), \dots, g(\gamma_{m+n})$ nicht von einander unabhängig (vgl. Nr. 2); *Borchardt* nimmt bei $m = n$ die von einander unabhängigen Werte von f und g für willkürliche $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{n+1}$ und bestimmt daraus die R.

Hervorzuheben ist hier noch eine Arbeit von *P. Gordan* (*Math. Ann.* 7 [1874], p. 433), in der eine Determinantenformel von *A. Brill* (*Math. Ann.* 4 [1871], p. 530) zur Aufstellung von Relationen zwischen Wurzel-Potenz-Determinanten und Koeffizienten einer Gleichung benutzt wird; diese liefern dann nicht nur die R. in ihrer Determinantenform, sondern auch eine Erweiterung derselben, bei welcher eine Determinante aus den Koeffizienten dreier Gleichungen gebildet wird, deren Verschwinden gleichfalls von der Existenz gemeinsamer Wurzeln abhängt. In derselben Abhandlung wird eine explicite Darstellung für den gr. gm. T. zweier F. geliefert.

17. Bedingungen für gemeinsame Teiler. Weiter noch trägt die Frage nach den Bedingungen dafür, dass f und g einen Faktor von vorgeschriebenem Grade k gemeinsam haben. Sie lässt sich nach der zweiten *Euler'schen* Methode behandeln und führt dabei auf die Bedingungen, dass ausser R auch $(k - 1)$ einfach gebildete Subdeterminanten von R verschwinden müssen. Sehr übersichtlich sind diese Ergebnisse von *W. Scheibner*⁹⁵⁾ hergeleitet.

91) Determinanten § 11. Conziser dargestellt von *Gordan-Kerschensteiner* 1, p. 153. Ein anderer Beweis von *Netto* (*Algebra* 1, § 144) erstreckt sich auch auf die Umformung entsprechender Subdeterminanten der Res.

92) *Math. Ann.* 35 (1890), p. 395.

93) *J. f. Math.* 30 (1846), p. 157.

94) *J. f. Math.* 57 (1860), p. 111 = *Berl. Ber.* 1859, p. 376 = *Werke* p. 131. Erweitert wurden diese Formeln durch *Kronecker*, *Berl. Ber.* 1865 Dez., p. 686.

95) *Leipz. Ber.* 40 (1888), p. 1. Vgl. auch *Faà di Bruno* l. c. § 5 ff., besonders § 11. — *Gordan-Kerschensteiner*, l. c. Nr. 129 ff. Weitere Untersuchungen

Nach derselben Richtung gehen die in Nr. 12 erwähnten *Kronecker*-schen Untersuchungen, welche an die Entwicklung von $f:g$ nach fallenden Potenzen von z anknüpfen⁹⁶). Setzt man, wie dort, $|c_{p+q}| = C_q$ ($p, q = 0, 1, \dots, q-1$), dann folgen für $n = m-1$ als charakteristische Bedingungen für die Existenz eines gr. gm. T. k^{ten} Grades von f und g und keines höheren Grades:

$$C_n = 0, \quad C_{n-1} = 0, \quad \dots \quad C_{n-k+1} = 0, \quad C_{n-k} \neq 0.$$

Netto hat die direkte Umwandlung dieser Determinanten in S und in die entsprechenden Subdeterminanten gegeben⁹⁷).

18. Eigenschaften der Resultanten. Aus den Darstellungen der R . lässt sich eine Reihe von Eigenschaften ablesen (I B 2): die R . ist homogen in den a vom n^{ten} und in den b vom m^{ten} Grade; sie ist *isobarisch* in den a und b vom Gewichte $m \cdot n$. Es ist $R(f, g_1 g_2) = R(f, g_1) \cdot R(f, g_2)$; und $R(f, g + \kappa f) = R(f, g)$, wenn κ eine Konstante bedeutet; ferner ist für $m = n$, wenn $\kappa, \lambda, \kappa', \lambda'$ Konstanten bedeuten, $R(\kappa f + \lambda g, \kappa' f + \lambda' g) = (\kappa \lambda' - \kappa' \lambda)^m \cdot R(f, g)$, (Invariantencharakter).⁹⁸) Für die Resultanten bestehen Differentialgleichungen⁹⁹), z. B. die beiden folgenden:

$$m a_0 \frac{\partial R}{\partial a_1} + (m-1) a_1 \frac{\partial R}{\partial a_2} + \dots + n b_0 \frac{\partial R}{\partial b_1} + (n-1) b_1 \frac{\partial R}{\partial b_2} + \dots = 0,$$

$$b_0 \frac{\partial R}{\partial a_0} + b_1 \frac{\partial R}{\partial a_1} + \dots + b_m \frac{\partial R}{\partial a_m} = 0,$$

die zur numerischen Berechnung der in R eintretenden Konstanten benutzt werden können. *M. Nöther* hat bewiesen (*Faà di Bruno-Walter*, l. c. p. 281), dass alle hier möglichen Differentialgleichungen Folgen der einen charakteristischen sind:

$$\sum (a_{x+1} b_0 - a_0 b_{x+1}) \frac{\partial R}{\partial a_x} + b_1 R = 0.$$

Sind die a, b allgemeine Grössen, dann ist R . irreduktibel¹⁰⁰); sind dieselben aber Funktionen anderer Variablen u, v, \dots , so kann R in Faktoren zerfallen, deren einige von u, v, \dots frei sind; *Sylvester*

sind von *V. Hioux*, Ann. Éc. Norm. (2) 10 (1881), p. 389; von *B. Igel*, Wien. Ber. 75 (1877), p. 145; *G. Darboux*, Bull. scienc. math. 10 (1876), p. 56 u. (2) 1 (1877), p. 54, ohne wesentlich Neues zu fördern, angestellt worden.

96) Berl. Ber. 1881, p. 535. *N. v. Szütz*, Monatsh. Math. Phys. 9 (1898), p. 34.

97) J. f. Math. 116 (1896), p. 33.

98) *Jacobi*, J. f. Math. 15 (1836), p. 101 = Werke 3, p. 295.

99) Von *F. Brioschi* aufgestellt J. f. Math. 53 (1857), p. 372; Ann. di mat. 2 (1859). Weiter behandelt von *Faà di Bruno*, J. f. Math. 54 (1857), p. 283; später von *Noether* genauer untersucht in der Übersetzung von *Faà di Bruno*.

100) *Netto*, Algebra 1, § 153.

nennt sie (Anm. 85) „spezielle Faktoren“ und den zurückbleibenden Teil, welcher ihm aus geometrischen Gründen wichtig ist, die *reduzierte R.*¹⁰¹⁾. — Haben $f=0$, $g=0$ nur eine W. ξ gemeinsam, dann ist für beliebige λ , μ , κ und σ ¹⁰²⁾

$$\xi^\lambda : \xi^\mu = \frac{\partial R}{\partial a_{m-\lambda-\kappa}} : \frac{\partial R}{\partial a_{m-\mu-\kappa}} = \frac{\partial R}{\partial b_{n-\lambda-\sigma}} : \frac{\partial R}{\partial b_{n-\mu-\sigma}}.$$

Dieser Satz lässt sich auf mehrere gemeinsame Wurzeln ausdehnen.

Setzt man mit einem Parameter ϱ

$$f = a_0 \varrho^k + a_1 \varrho^{k-1} z + \dots + a_{k-1} \varrho z^{k-1} + a_k z^k + a_{k+1} z^{k+1} + \dots + a_m z^m,$$

$$g = b_0 \varrho^l + b_1 \varrho^{l-1} z + \dots + b_{l-1} \varrho z^{l-1} + b_l z^l + b_{l+1} z^{l+1} + \dots + b_n z^n$$

$$\varphi = a_0 + a_1 z + \dots + a_k z^k; \quad \varphi' = b_0 + b_1 z + \dots + b_l z^l,$$

$$\psi = a_k + a_{k+1} z + \dots + a_m z^{m-k}; \quad \psi' = b_l + b_{l+1} z + \dots + b_n z^{n-l},$$

so wird $R(f, g)$, nach steigenden Potenzen von ϱ entwickelt, mit dem Gliede $R(\varphi, \varphi') \cdot R(\psi, \psi') \cdot \varrho^{kl}$ beginnen¹⁰³⁾. —

Mit Hülfe der *Kronecker'schen* Entwicklungen von $f: g$ (Nr. 12) kann die Theorie der R. ohne Voraussetzung des Fundamentaltheorems durchgeführt, und dann darauf der Beweis dieses Theorems gestützt werden. Das ist der *Gordan'sche* Gang (vgl. Nr. 5) des W.-Existenzbeweises. — *Gordan* fasst¹⁰⁴⁾ die R. auch als bilineare Form $\sum \pm A_x B_x$ auf, wobei nach dem *Laplace'schen* Zerlegungssatze die A_x Determinanten der a , und die B_x Determinanten der b bedeuten. Die Determinante dieser bilinearen Form hat dann den Wert ± 1 .

*J. Lüroth*¹⁰⁵⁾ leitet die Hauptsätze über R. mittels des Begriffes des kleinsten gemeinsamen Vielfachen, statt, wie es gewöhnlich geschieht, des grössten gemeinsamen Teilers her.

19. Berechnung der Resultanten. Die Berechnung der Resultanten ist umständlich. *Cayley*¹⁰⁶⁾ bedient sich einer Art geometrischer Darstellung der R., um ihre Koeff. übersichtlich anzuordnen. Die erste von ihm benutzte Berechnungsmethode hatte schon *Cramer* (Anm. 79) angewendet; sie stützt sich auf die *Cramer-Poisson'sche* Produkt-

101) *Cayley*, J. f. Math. 34 (1847), p. 30 = Coll. Pap. 1, p. 143. Über eine andere Bedeutung dieses Ausdrucks siehe I B 1 b Nr. 15.

102) *Richelot*, J. f. Math. 21 (1840), p. 226.

103) *W. Fr. Meyer*, Gött. Nachr. 1895, p. 119 u. 135; *Acta math.* 19 (1895), p. 385. (Analog für $D(f)$, vgl. Nr. 20 u. f.) *Netto*, Gött. Nachr. 1895, p. 209. Andere Bemerkungen über die Struktur der R. liefert *A. Brill*, *Math. Ann.* 16 (1880), p. 348.

104) *Math. Ann.* 45 (1894), p. 405. Die Bedeutung des Satzes erhellt erst aus einer Arbeit von *A. Hurwitz*, *ibid.* 45 (1894), p. 401.

105) *Zeitschr. Math. Phys.* 40 (1895), p. 247.

106) *Lond. Trans.* 147 (1857), p. 703 = Coll. Pap. 2, p. 440.

darstellung und auf die Benutzung symmetrischer F.; *Cayley's* zweite Methode knüpft an die Determinanten-Form an und benutzt die Nr. 18 gegen Ende erwähnte Darstellung $\sum \pm A_x B_x$. Dieselbe Form wertet *E. Dr. Roe jr.*¹⁰⁷⁾ aus, indem er die R. als vierfache Summe darstellt; die Glieder der R. zerfallen in „Normalformen“ und in „reducible Formen“. — Schon *Newton* giebt in der „*Arithmetica universalis*“ die einfachsten Resultate an. In *Salmon's* „*Higher algebra*“ finden sich die R. für $(m, n) = (2, 2), (3, 2), (4, 2), (5, 2); (3, 3), (4, 3); (4, 4)$. Bei $(4, 4)$ giebt es bereits 217 Terme. Eine ähnliche Tabelle giebt *Faà di Bruno* in seinen „*Binären Formen*“. *Gordan*¹⁰⁸⁾ liefert die Untersuchungen zur allgemeinen invariantentheoretischen Berechnung, sowie die fertigen Formeln für $(m, n) = (6, 2); (5, 3); (5, 4)$; *Clebsch*¹⁰⁹⁾ für $(m, 2)$ mittels symbolischer Produkte; *Roe* (l. c.) wieder für $(m, 2)$ und $(5, 4)$; *E. Pascal*¹¹⁰⁾ für $(m, 3)$.

Bei manchen geometrischen Untersuchungen handelt es sich lediglich darum, den Grad einer Resultante oder Diskriminante (siehe folgende Nummer) abzuzählen. Solche Bestimmungen finden sich bei *W. Fr. Meyer*¹¹¹⁾, wo die Grade bei einer Anzahl von speziellen, geometrisch wichtigen Gleichungen angegeben werden.

Ebenda wird auf *Reduktibilitätsfragen* bei R. und Diskriminanten (Nr. 20) eingegangen; aus der Natur der Singularitäten von ebenen wie räumlichen Kurven schliesst man, dass das Zusammenrücken zweier singulärer Elemente meistens noch dasjenige eines weiteren singulären Elementes zur Folge hat. Daher haben die Diskriminanten und R. der Gl., von denen die einfachsten Singularitäten abhängen, Faktoren miteinander gemeinsam. Die Zerlegung solcher R. und Diskriminanten wird in den beiden Arbeiten geliefert. (Vgl. noch *Brill*, *Math. Ann.* 16, 1880, p. 348.)

Die R. gewisser, aus einer Stammform abgeleiteter Formen sind durch die Diskriminante der Form (Nr. 20) teilbar¹¹²⁾. Ebenso werden in einer ausgedehnten Reihe von Fällen die Invarianten und Kovarianten binärer Formen durch gewisse Potenzen der R. oder der Diskriminante der Stammform teilbar¹¹³⁾.

107) „Die Entwicklung der Sylvester'schen Determinante nach Normalformen“. Leipz., Teubner (1898).

108) *Math. Ann.* 3 (1871), p. 389.

109) *J. f. Math.* 58 (1861), p. 273.

110) *Gi. di mat.* 25 (1887), p. 257; *Nap. Rend.* (2) 2 (1888), p. 67.

111) *Math. Ann.* 38 (1891), p. 369 und *ibid.* 43 (1893), p. 286.

112) *P. Gordan*, *Math. Ann.* 4 (1871), p. 169.

113) *G. Kohn*, *Wien. Ber.* 100 (1891), p. 865 u. 1013; *ib.* 102 (1893), p. 801.

— *E. Waelsch*, *ibid.* 100 (1891), p. 574.

20. Diskriminante. Nimmt man $g(z) = f'(z)$ und setzt $R(f, f') = a_0 D(f)$, so heisst D die *Diskriminante* (D.) von f .¹¹⁴⁾ Es wird

$$D = a_0^{m-2} f'(\alpha_1) \cdots f'(\alpha_m) = (-1)^{\frac{1}{2} m(m-1)} a_0^{2m-2} \Pi (\alpha_\lambda - \alpha_\mu)^2.$$

$D=0$ ist charakteristisch dafür, dass f und f' einen gm. T. haben, dass also $f=0$ mehrfache Wurzeln besitzt (Nr. 14). Aus der Determinantenform von R folgt hier

$$D = \frac{1}{a_0} \begin{vmatrix} a_x & a_{x+1} & \cdots & a_{2m-2+x} \\ (m-\lambda)a_\lambda & (m-\lambda-1)a_{\lambda+1} & \cdots & (-m+2-\lambda)a_{2m-2+\lambda} \end{vmatrix} \begin{matrix} (x=0, -1, \dots -m+1) \\ (\lambda=0, -1, \dots -m) \end{matrix}$$

(a_x ist 0, wenn x negativ oder grösser als n genommen wird).

Man kann die D. in Gestalt einer Determinante $(m-1)^{\text{ter}}$ Ordnung darstellen. Macht man bei $z = \frac{x}{y}$ durch Multiplikation mit y^m die $F. f\left(\frac{x}{y}\right)$ ganz und homogen, so ist

$$D = \frac{1}{m^{m-2}} R\left(\frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial x}\right).$$

Führt man die Koeffizienten der Entwicklung von $f'(z):f(z)$ ein (vgl. die C_q in Nr. 17), welche hier (vgl. die erste Formel in Nr. 14) Summen der Wurzelpotenzen werden $c_0 = s_0, c_1 = s_1, \dots$, so folgt die *Cayley'sche* Darstellungsform, J. de Math. 11 (1846), p. 298 = Coll. Pap. 1, p. 306

$$D = (-1)^{\frac{1}{2} m(m-1)} a_0^{2m-2} \cdot |s_{x+\lambda}| \quad (x, \lambda = 0, 1, \dots m-1).$$

21. Eigenschaften der Diskriminante. Die D. ist in den Koeff. von $f(z)$ homogen vom Grade $(2m-2)$ und isobarisch vom Grade $m(m-1)$. — Ist ξ eine Doppelw. von $f=0$, so gilt die Gl.

$$1 : \xi : \xi^2 : \dots = \frac{\partial D}{\partial a_m} : \frac{\partial D}{\partial a_{m-1}} : \frac{\partial D}{\partial a_{m-2}} : \dots;$$

dieser Satz lässt sich auf Wurzeln von höherer Multiplizität, entsprechend modifiziert, ausdehnen¹¹⁵⁾. — Es ist ferner

$$D(f_1 f_2) = (-1)^{m_1 m_2} D(f_1) \cdot D(f_2) \cdot R^2(f_1, f_2),$$

wenn m_1, m_2 die Ordnungen von f_1 und von f_2 bedeuten. — Für die D. gelten partielle Differentialgl., wie z. B.

114) *Sylvester*, Phil. Mag. (4) 2 (1851) II, p. 406; Cambr. a. Dubl. M. J. 6 (1847), p. 52. — *Gauss* gebraucht dafür die Bezeichnung: „Determinante“, Disq. arithm. Sect. V, § 154 = Werke 1, p. 122.

115) Vgl. *Jacobi*, J. f. Math. 15 (1836), p. 106; *Richelot*, J. f. Math. 21 (1840), p. 228. — *C. Brioschi*, Teor. dei Determinanti, Pavia 1854.

$$ma_0 \frac{\partial D}{\partial a_1} + (m-1)a_1 \frac{\partial D}{\partial a_2} + \cdots + a_{m-1} \frac{\partial D}{\partial a_m} = 0;$$

auch hier hat *Noether* (l. c. Nr. 18) nachgewiesen, dass alle möglichen Differentialgl. aus einer einzigen abgeleitet werden können. — *Serret*¹¹⁶⁾ benutzt solche Differentialgl. zur Berechnung der Zahlenfaktoren der *D*.

*Hilbert*¹¹⁷⁾ löst die Aufgabe, zwei binäre Formen f_1, f_2 des Grades n so zu bestimmen, dass $D(\lambda f_1 + \mu f_2)$ eine gegebene Form des Grades $(2n-2)$ von λ und μ wird.

Für die Gleichungen niederer Grade ist es gelungen, D durch „fundamentale“ Invarianten (niedrigeren Grades) auszudrücken (I B 2). *G. Boole*¹¹⁸⁾ hat D von $az^4 + 4bz^3 + 6cz^2 + 4dz + e = 0$ auf die Form $D = 16(I^3 - 27J^2)$ gebracht, wobei für I und J die Invarianten

$$I = ae - 4bd + 3c^2, \quad J = ace + 2bcd - ad^2 - eb^2 - c^3$$

zu setzen sind. Für Gl. 5^{ten}, 6^{ten}, 7^{ten} Grades ist ähnliches durch *G. Salmon*¹¹⁹⁾, *F. Brioschi*¹²⁰⁾, *G. Maisano*¹²¹⁾, *Gordan*¹²²⁾ geleistet. Ein systematisches Verfahren hierfür hat *Gordan* angegeben¹²³⁾.

G. Bauer knüpft im Anschluss an *A. Cayley* die Berechnung der *D*. binärer Formen an die Gestalt $D = a_1^2 V + a_0 U$ an¹²⁴⁾.

22. Diskriminantenfläche. Deutet man bei $a_0 = 1$ die unbestimmt gedachten Koeff. a_1, a_2, \dots, a_n von $f(z)$ als Koordinaten eines Punktes P im Raume von n Dimensionen, dann liefert $D(a_1, \dots, a_n) = 0$ die *Diskriminantenfläche*. Ändern sich bei der Bewegung des Punktes P die Realitätsverhältnisse der Gl.-W., so ist dies nur möglich, wenn P , auch den Multiplizitäts-Charakter ändernd (Nr. 14), $D = 0$ passiert¹²⁵⁾. $D = 0$ teilt den Raum in Gebiete von invariantem Realitäts-Charakter. Hierauf hat *Kronecker* im Anschluss an seine Charakteristiken-theorie aufmerksam gemacht (vgl. I B 1 b, Nr. 25). Er untersucht

116) *Serret*, Alg. supér. 1, Nr. 202.

117) *Math. Ann.* 31 (1887), p. 482.

118) *Cambr. M. J.* 2 (1841), p. 70. Siehe ferner *Cayley*, *Cambr. M. J.* 4 (1845), p. 193 = *Coll. Pap.* 1, p. 94; weiter *Lond. Trans.* 148 (1858), p. 429, § 129 = *Coll. Pap.* 2, p. 527; vgl. auch *Clebsch*, *J. f. Math.* 64 (1865), p. 95.

119) *Cambr. a. Dubl. M. J.* 9 (1854), p. 32.

120) *Ann. di Mat.* (2) 1 (1867), p. 159.

121) *Math. Ann.* 30 (1885), p. 442.

122) *Math. Ann.* 31 (1888), p. 566.

123) *Gordan-Kerschensteiner*, Vorlesungen 2, p. 108.

124) *G. Bauer*, *Münch. Ber.* (1886), p. 189; *Cayley*, *J. f. Math.* 47 (1854), p. 109 = *Coll. Pap.* 2, p. 164. Vgl. noch *Anm.* 103.

125) *Brill*, *Math. Ann.* 12 (1877), p. 87; *Kerschensteiner*, *Diss. Erl.* 1888.

nach dieser Methode die Gl. vierten Grades¹²⁶). *Hilbert* zeigt, dass die Bestimmung der mannigfaltigen Ausartungen einer f durch die D. und ihre Polaren allein schon möglich sei¹²⁷). Seine Arbeit steht mit früheren von *Cayley*¹²⁸) und *Sylvester*¹²⁹) im Zusammenhange, wo „Evektanten“ (vgl. Nr. 14 Schluss) und deren Struktur zu gleichem Zwecke verwendet werden.

23. Funktionen mit reellen Nullstellen. Realitätsverhältnisse.

Die Frage nach den Gebieten, in welche die $D(a_1, \dots) = 0$ den Raum teilt, führt zu der Frage nach dem Gebiete, welches die Funktionen mit nur reellen Nullstellen bestimmt. Von den hierüber bekannten Theoremen führen wir an: Das *Legendre'sche* Polynom, d. h. die n^{te} Ableitung von $(z(z-1))^n$ hat lauter getrennte, reelle, zwischen 0 und 1 liegende Nullstellen; die „Säkulargleichung“ (vgl. I A 2, Nr. 26, Anm. 100) hat reelle Wurzeln; das Gleiche gilt für die *Biehler'schen* Gleichungen $U=0$, $V=0$, wobei $U+iV=\prod(z-a_2-i b_1^2)$ ist. Es giebt nach dieser Richtung hin eine Fülle von Spezialuntersuchungen¹³⁰), auf die wir nur hindeuten können.

Die Theorien über die Realitätsverhältnisse der W. einer Gl. fallen in die Behandlung der Gl. (vgl. I B 3a). — Hier seien noch die Arbeiten von *Fr. Meyer* erwähnt¹³¹), welche folgendes Problem erledigen: Welchen Änderungen sind die Anzahlen der reellen Singularitäten von Kurven unterworfen, wenn bei Variation der Kurven ein Zusammenfallen zweier Singularitäten durch das Verschwinden gewisser Faktoren der D. oder der R. stattfindet, welche den Singularitätsgleichungen angehören. Wenn man ferner jedesmal noch die D. der quadratischen Gl., deren W. näherungsweise die beiden koincidierenden W. sind, auf ihr Vorzeichen untersucht, kann man daraus wesentliche Schlüsse auf gewisse bei jener Variation invariante Zahlen ziehen. Die Methode geht offenbar über die besprochene Aufgabe hinaus.

24. Hinweise auf angrenzende Gebiete. Die Theorie der binären Formen ist lediglich wegen der Verschiedenheit der verwendeten Hilfs-

126) Berl. Ber. 1878, Febr. p. 119; siehe auch *C. Fuerber*, Dissert. Berl. 1889; *R. E. Hoppe*, Arch. f. Math. u. Phys. 14 (1896), p. 398; *Brill*, Math. Ann. 20 (1882), p. 330.

127) Math. Ann. 30 (1887), p. 437.

128) Lond. Trans. 147 (1857), p. 727 = Coll. Pap. 2, p. 465.

129) Phil. Mag. (4) 3 (1852), p. 375 u. 460.

130) Ausführliche Angaben finden sich in *Netto*, Algebra I, Abschnitt 2.

131) *A. Brill*, Math. Ann. 16 (1880), p. 345 u. 348; *W. Fr. Meyer*, ibid. 38 (1891), p. 369; 43 (1893), p. 286; Gött. Nachr. 1888, p. 74; 1890, p. 366 u. 493; 1891, p. 14 u. 88; Monatsh. f. Math. Phys. 4 (1893), p. 229 u. 331.

mittel der Forschung an anderer Stelle untergebracht (IB 2). — Die Fragen nach der Umwandlung rationaler F . durch lineare Substitutionen gehören gleichfalls zum Gebiete der Invariantentheorie IB 2. — Die Ketten von F ., welche in Nr. 12 als f, f_1, f_2, \dots, f_r aufgeführt sind, werden als *Sturm'sche* Reihen in IB 3 a besprochen werden. — Erwähnt seien die Untersuchungen von *P. L. Tschebyscheff* über gz. rat. F ., die sich innerhalb eines bestimmten Intervalles gegebenen F . möglichst genau anschmiegen, also z. B. die gz. F ., welche dem Wert des Bruches $\frac{1}{\alpha - z}$ in einem Intervalle möglichst nahe bleibt; diese Aufgabe ist für die Integration gewisser F . von Wichtigkeit [II A 2]. Damit im Zusammenhange stehen seine Arbeiten über gz. F . $g(z)$, deren grösste absolute Werte in gegebenen Intervallen möglichst klein werden¹³²⁾ [I D 2, 3; I E]; wenn nämlich $\varphi(z)$ die gegebene F . und $F(z)$ das annähernde Polynom ist, dann wird dieses durch die Bedingung bestimmt, dass $\varphi(z) - F(z)$ für alle Wurzeln von $g(z)$ verschwindet.

132) St. Petersb. Denkschr. 61 (1889); 64 (1891), p. 1; St. Petersb. Abh. 72 (1893), p. 1; St. Pétersb. Mém. 22 (1873); Moscou Soc. Philom. 4 (1870). Acta math. 18 (1894), p. 113; *E. Vallier* C. R. 116 (1893). p. 712.

Verzeichnis der Abkürzungen.

D	=	Diskriminante
F	=	Funktion
gbr	=	gebrochen
Gl	=	Gleichung
gm	=	gemeinsam
gr	=	grösster
gz	=	ganz
irred	=	irreduktibel
Koeff	=	Koeffizient
R	=	Resultante
rat	=	rational
Rat.-Br	=	Rationalitäts-Bereich
red	=	reduktibel
T	=	Teiler
W	=	Wurzel

IB1b. RATIONALE FUNKTIONEN MEHRERER VERÄNDERLICHEN

VON

E. NETTO

IN GIESSEN.

Inhaltsübersicht.

1. Definitionen.
 2. Wurzeln. — Identisches Verschwinden.
 3. Potenzentwicklung gewisser rationaler Funktionen.
 4. Mehrfache Wurzeln. — Unendlich grosse Wurzeln.
 5. Reduktibilität und Irreduktibilität.
 6. Elimination. — *Bézout'sche* Methode.
 7. *Poisson'sche* Methode. — Eliminante.
 8. *Cayley'sche* und *Sylvester'sche* Methode.
 9. *Kronecker'sche* Methode. — Stufenzahl.
 10. *Minding'sche* Regel. — *Labatie's* Theorem.
 11. Vielfache und unendliche Wurzeln eines Gleichungssystems.
 12. Auflösung linearer Gleichungen. — Spezielle Eliminationsprobleme.
 13. Eigenschaften der Eliminante.
 14. Resultante und ihre Eigenschaften.
 15. Reduzierte Resultante.
 16. Reduktibilität und Teilbarkeit von Gleichungssystemen.
 17. Diskriminante eines Gleichungssystems.
 18. Diskriminante einer Gleichung.
 19. Unabhängigkeit von Funktionen.
 20. Unabhängigkeit von Gleichungen.
 21. Funktionaldeterminante.
 22. *Hesse'sche* Determinante.
 23. *Jacobi's* Erweiterung einer *Euler'schen* Formel.
 24. Wurzelrelationen eines Gleichungssystems. — Interpolation.
 25. Charakteristik eines Funktionensystems.
 26. Modul- oder Divisoren-Systeme.
 27. Weitere Hinweise. Verzeichnis der Abkürzungen.
-

Hinsichtlich der Litteratur muss auf die beim vorigen Abschnitte aufgeführten Werke verwiesen werden; speziell für rationale Funktionen mehrerer Variablen giebt es keine Monographien.

1. Definitionen. Ein Ausdruck

$$(1) \quad f(z_1, z_2, z_3, \dots, z_m) = \sum_{\alpha, \beta, \gamma, \dots} c_{\alpha\beta\gamma\dots} z_1^\alpha z_2^\beta z_3^\gamma \dots z_m^\delta,$$

in welchen die m Veränderlichen, Variablen z_1, z_2, \dots, z_m und die Konstanten $c_{\alpha\beta\gamma\dots}$ eintreten, und in dem die Summe $(\alpha + \beta + \dots + \delta)$ alle Werte $0, 1, 2, \dots, n$ durchläuft, während die α, β, \dots ganze nicht negative Zahlen sind, heisst eine ganze Funktion n^{ter} Dimension (gz. F.) der m Variablen z_i . Sie hat¹⁾ im allgemeinen Falle

$$N(n, m) = \binom{n+m}{m} = N(m, n)$$

Terme (Potenzprodukte). Die Anzahl derjenigen Terme unter ihnen, die durch keins der Monome $z_1^{a_1}, z_2^{a_2}, \dots, z_m^{a_m}$ teilbar sind, beträgt in der Bezeichnung der Differenzenrechnung $\mathcal{A}_{a_1, \dots, a_m}^{(m)} N(n, m)$.

Man kann vermittlest der Auflösung linearer Gleichungen für die c durch $N(n, m)$ vorgeschriebene Werte $f^{(e)}$ von (1) für eben so viele Wertsysteme $(z_1, z_2, \dots, z_m) = (\xi_{1e}, \xi_{2e}, \dots, \xi_{me})$ „im allgemeinen“ die F. (1) bestimmen, d. h. dann und nur dann, wenn das System (ξ_{1e}, \dots) eine gewisse Determinante nicht zu Null macht²⁾. Das naturgemäss hierher gehörige Interpolationsproblem kann erst in Angriff genommen werden, wenn weitere Vorbereitungen erfolgt sind (vgl. Nr. 24).

Kommen in (1) nur Terme vor, bei denen $(\alpha + \beta + \gamma + \dots)$ denselben Wert n besitzt, dann heisst f eine *homogene* gz. F. der n^{ten} Dimension (Euler, Introductio 1, cap. 5).

2. Wurzeln. Identisches Verschwinden. Einen Wertkomplex $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)$, welcher (1) zu Null macht, nennen wir eine *Wurzel* (W.) (Auflösung, solutio) von $f=0$ oder eine Nullstelle von f ; $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m$ heissen nach gebräuchlicher geometrischer Bezeichnung die *Koordinaten*. Die in Nr. 1 besprochenen Eigenschaften zeigen, dass

1) Derartige Abzählungen zum Zwecke der Elimination hat *É. Bézout* angestellt, *Théorie générale des équations*, Paris 1779: Weitere Ausführungen stammen von *J.-A. Serret*: *Algèbre supérieure* 1 (troisième édit. Paris 1866), p. 142ff. und von *E. Netto*, *Algebra* 2, 1 (Leipzig 1898).

2) Aus der Nichtberücksichtigung dieses Umstandes folgt das *Euler'sche Paradoxon*. *L. Euler*, *Berl. Mém.* 1748, p. 219 schliesst z. B., dass durch 9 Punkte einer Ebene *stets eine und nur eine* Kurve dritter Ordnung gelegt werden könne; dies stehe dann im Widerspruch zu dem Umstande, dass zwei Kurven dritter Ordnung sich in 9 Punkten schneiden (Nr. 6). Vgl. auch *G. Cramer*, *Analyse etc.* § 48, p. 78; *C. G. J. Jacobi*, *J. f. Math.* 15 (1836), p. 285 = Werke 3, p. 329. Das Paradoxon löst sich sofort, wenn man das Verschwinden jener Determinante aus Potenzprodukten der Koordinaten beachtet.

zwischen je $N(n, m)$ W. von (1) Relationen bestehen, so dass also (anders als für $m = 1$) die Gesamtheit der W. einer Gl. $f(z_1, z_2, \dots) = 0$ nicht willkürlich gewählt werden kann (vgl. Nr. 24).

Ist jedes beliebige Wertsystem (ξ_1, \dots, ξ_m) eine W. von (1), dann sind alle c gleich Null, d. h. es ist $f \equiv 0$. — Wenn ein Produkt mehrerer gz. F. für jedes Wertsystem (ξ_1, \dots, ξ_m) verschwindet, dann ist mindestens einer der Faktoren identisch gleich Null.

3. Potenzentwicklung gewisser rationaler Funktionen. Über die Entwicklung gewisser rationaler F. mehrerer Var. nach steigenden und fallenden Potenzen derselben stellt C. G. J. Jacobi³⁾ Untersuchungen an, deren Wesen aus dem folgenden, für zwei Var. gegebenen Resultate klar wird. Der erste (zweite) Bruch des Produktes

$$R(x, y) = \frac{1}{ax + by - t} \cdot \frac{1}{b_1 y + a_1 x - t_1}$$

wird nach fallenden Potenzen von x (von y) entwickelt; dann liefert $R(x, y)$ dreierlei Arten von Gliedern: α) solche, in denen x und y ; β) solche, in denen nur x ; endlich γ) solche, in denen nur y in negativen Potenzen auftreten. Man kann $R = L_\alpha + L_\beta + L_\gamma$ derart bestimmen, dass die Entwicklung der einzelnen $L_\alpha, L_\beta, L_\gamma$ alle und nur die einzelnen Glieder α) bzw. β) und γ) liefert. — Ferner werden Theoreme abgeleitet, wie das folgende: Die Koeffizienten von $x^{-\mu} y^{-\nu}$ und von bzw. $t^m t_1^n$ in

$$\frac{1}{(ax + by)^{m+1}} \cdot \frac{1}{(b_1 y + a_1 x)^{n+1}} \quad \text{und in} \quad \frac{(b_1 t - b t_1)^{\mu-1} (a t_1 - a_1 t)^{\nu-1}}{(a b_1 - a_1 b)^{\mu+\nu-1}}$$

stimmen überein. — Weitergeführt sind diese Untersuchungen nicht.

4. Mehrfache Wurzeln. — Unendlich grosse Wurzeln. Man kann durch eine lineare, umkehrbare Transformation eine gegebene F. f so zubereiten, dass dadurch jede der neuen Var. zu einem Grade aufsteigt, die der Dimension der F. gleich wird. Dadurch werden Besonderheiten der Gl.-Form vermieden, z. B. die, dass Wurzeln von $f = 0$ vorkommen, bei denen nur einzelne Koordinaten unendlich gross werden. Vgl. Nr. 11.

Ist nämlich, nach fallenden Potenzen von z_1 geordnet,

$$f = \varphi_0(z_2, \dots, z_m) z_1^v + \varphi_1(z_2, \dots, z_m) z_1^{v-1} + \dots + \varphi_v(z_2, \dots, z_m),$$

und bedeutet (ξ_2, \dots, ξ_m) eine W. von $\varphi_0 = 0$, so nennt man auf Grund einer Grenzbetrachtung oder der Einführung von $y_1 = 1 : z_1$ auch $(\infty, \xi_2, \dots, \xi_m)$ eine W. von $f = 0$. Durch die erwähnte Substitution kann man es erreichen, dass keine W. existiert, welche gleichzeitig endliche und unendliche Koordinaten hat.

3) J. f. Math. 5 (1830), p. 344 = Werke 3, p. 67.

Ist f homogen, und $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)$ eine W. von $f=0$, so ist für jedes ϱ auch $(\xi_1\varrho, \xi_2\varrho, \dots, \xi_m\varrho)$ eine W. von $f=0$.

Ist f nicht homogen, und ordnet man es nach homogenen Komplexen von Gliedern fallender Dimensionen:

$$f = g_n(z_1, z_2, \dots, z_m) + g_{n-1}(z_1, z_2, \dots, z_m) + \dots + g_0,$$

ist ferner $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)$ eine W. der homogenen Gl. $g_n=0$, dann ist für $\varrho = \infty$ auch $(\xi_1\varrho, \xi_2\varrho, \dots, \xi_m\varrho)$ eine W. von $f=0$; oder auch, $\xi_1 : \xi_2 : \dots : \xi_m$ giebt das Verhältnis der Koordinaten einer unendlich grossen W. von $f=0$. Ist g_n eine „definite Form“, d. h. hat es ausser $(0, 0, \dots)$ keine reellen Nullstellen, dann liegt $f=0$ ganz im Endlichen.

Der Teilbarkeit von $f(z)$ durch $(z - \xi)$, wenn ξ eine W. von $f(z)=0$ ist, stellt sich hier als Analogon zur Seite, dass wenn (ξ_1, \dots, ξ_m) eine W. von (1) ist, dann Gleichungen der Form

$f(z_1, \dots, z_m) = (z_1 - \xi_1)\chi_1 + (z_2 - \xi_2)\chi_2 + \dots + (z_m - \xi_m)\chi_m$ bestehen⁴). Hat jedes $\chi_1 = 0, \dots, \chi_m = 0$ wieder dieselbe W. (ξ_1, \dots, ξ_m) , dann kann ähnlich weiter auf verschiedene Weise

$$f = \sum_{(\alpha, \beta)} (z_\alpha - \xi_\alpha)(z_\beta - \xi_\beta)\psi_{\alpha, \beta}$$

gesetzt werden. In diesem Falle heisst (ξ_1, \dots, ξ_m) eine *Doppelwurzel*. In gleicher Weise kann man Wurzeln *höherer Multiplizitäten* definieren. Für eine ϱ -fache W. verschwinden mit f zugleich alle Ableitungen bis inclusive der $(\varrho - 1)^{\text{ten}}$. Vgl. Nr. 11 und Nr. 17.

5. Reduktibilität und Irreduktibilität. f heisst *reduktibel* (red.) oder *irreduktibel* (irred.), je nachdem es als ein Produkt ähnlicher Faktoren wie f dargestellt werden kann oder nicht. Anders als bei einer einzigen Var. gilt hier der Satz, dass auch bei beliebig erweitertem Rationalitätsbereiche allgemeine F. nicht in (lineare) Faktoren zerlegbar sind⁵). Ob eine gegebene F. red. ist oder nicht, kann prak-

4) L. Kronecker, Berl. Ber. 1865, p. 687 hat diese Form seinen Untersuchungen über Interpolation zu Grunde gelegt.

5) Über die Zerlegbarkeit bei $m = 2$ vgl. S. H. Aronhold, J. f. Math. 55 (1858), p. 97; F. Brioschi, Ann. di mat. (2) 7 (1875/76), p. 189; A. Thuer, Math. Ann. 14 (1879), p. 545. Die Frage nach den Bedingungen des Zerfallens, sowie nach den Faktoren der zerfallbaren Formen wird mit Hilfe der Theorie der symmetrischen Funktionen mehrerer Grössenreihen von Fr. Junker behandelt, Math. Ann. 45 (1894), p. 1, der an Untersuchungen von A. Brill, Gött. Nachr. Dez. 1893, p. 757 anknüpft. Das gleiche Problem behandelt P. Gordan, Math. Ann. 45 (1894), p. 410, unter Verwendung gewisser Differentialprozesse, besonders für ternäre Formen. Vgl. weiter Brill, Math. Ann. 50 (1898), p. 157; ferner J. Hadamard, Bull. soc. math. 27 (1899), p. 34.

tisch entweder so untersucht werden, dass man substituiert: $z_1 = t$, $z_2 = t^2$, $z_3 = t^3, \dots$ und dabei q so hoch nimmt, dass alle Potenzprodukte in f als Potenzen von t verschiedene Exponenten erhalten; dann die neue F. der einen Var. t auf ihre Reduktibilität untersucht, und von den etwa gefundenen Faktoren in t auf solche in den z zurück zu gehen sucht⁶⁾; oder man kann das *Kronecker'sche* Verfahren bei einer Var., welches sich auf die *Lagrange'sche* Interpolationsformel stützt⁷⁾, direkt auf den Fall mehrerer Var. erweitern.

Die Ableitung des grössten gemeinsamen Teilers (gr. gm. T.) ist auch für $m > 1$ mit Hilfe des *Euklid'schen* Algorithmus möglich (vgl. I B 1 a Nr. 12). Bei den hier nötigen Divisionen wird eine der Var. etwa z_1 bevorzugt; dadurch treten gebrochene F. der anderen z_2, z_3, \dots auf, deren sonst störender Einfluss durch eine vorläufige Transformation (Nr. 4) beseitigt werden kann (vgl. auch Nr. 10 das *Labatie'sche* Theorem). Über die bei dem Algorithmus der fortgesetzten Division auftretenden Hilfsfunktionen gelten ähnliche Sätze wie bei einer Var. (I B 1 a Nr. 12). Dasselbe gilt für die Darstellung des gr. gm. T. als einer homogenen linearen F. der gegebenen F.

Durch Erweiterung kommt man zu dem Satze, dass wenn T der gr. gm. T. von f_1, f_2, f_3, \dots ist, dann Polynome P_1, P_2, \dots gefunden werden können, welche eine Gl.

$$f_1 P_1 + f_2 P_2 + f_3 P_3 + \dots = T \cdot \Phi$$

befriedigen, in der Φ nicht mehr alle Var. z enthält.

Jetzt ist die Ableitung der Hauptsätze über irred. F. möglich; sie gestaltet sich in diesem Gebiete viel umständlicher als bei einer Var. und sie wird im allgemeinen auf den Schluss von n auf $(n+1)$ aufgebaut⁸⁾.

Es zeigt sich, dass die Zerlegung in irred. Faktoren eindeutig ist. — Eine irred. F. g teilt entweder die beliebige F. f oder ist zu ihr teilerfremd. — Ist $(f_1 \cdot f_2)$ durch eine irred. F. g teilbar, so ist mindestens einer der Faktoren f_1, f_2 durch g teilbar. — Ist f in zwei Faktoren zerlegbar, die in z_1 ganz und in z_2, z_3, \dots rational aber gebrochen sind, dann giebt es auch eine Zerlegung von f , in welcher beide Faktoren gz. F. aller z sind; *Gauss'scher* Satz (vgl. I B 1 a Nr. 13). — Verschwindet $f(z_1, \dots)$ für alle W. von $g(z_1, \dots) = 0$, dann ist f durch jeden einzelnen irred. Faktor von g teilbar⁹⁾, und also

6) L. Kronecker, Grundlagen einer arithm. Theorie u. s. w. § 4.

7) Netto, Algebra 2, 1. Vgl. I B 1 a Nr. 3 und Nr. 10.

8) J. Molk, Acta math. 6 (1885), p. 1; H. Weber, Algebra 1; Netto, Algebra 2, 1.

9) J. J. Sylvester's „logic of characteristics“, Cambr. Dubl. Math. J. 6 (1851), p. 186; bewiesen von O. Hölder, Böklen math. nat. Mitt. 1 (1884), p. 60; von

wird eine Potenz von f durch g selbst teilbar werden. Dieser Satz hat eine wesentliche Erweiterung durch *D. Hilbert* ¹⁰⁾; wir heben hier den für geometrische Anwendungen wichtigsten Fall seines allgemeinen Theorems heraus: Wenn f für alle Wertsysteme z_1, z_2, \dots, z_n verschwindet, welche $g_1 = 0, g_2 = 0, \dots, g_m = 0$ machen, dann giebt es einen Exponenten r derart, dass die Potenz f^r linear und homogen durch g_1, g_2, \dots, g_m darstellbar wird.

Ein anderer wichtiger, auf die Irreduktibilität bezüglicher Satz stammt gleichfalls von *Hilbert* ¹¹⁾: Wenn $f(z_1, z_2, \dots; p, q, \dots)$ eine irred. gz. ganzzahlige F. der Veränderlichen z_1, z_2, \dots und der Parameter p, q, \dots bezeichnet, so ist es stets auf unendlich viele Weisen möglich, für die Parameter p, q, \dots gz. rationale Zahlen einzusetzen, so dass dadurch die Funktion in eine irred. F. der Veränderlichen z_1, z_2, \dots übergeht. Dieses Theorem ist z. B. für die *Galois'sche* Theorie der Gleichungen von grundlegender Bedeutung.

Hier muss ferner ein Satz von *E. Bertini*, *Lomb. Rend.* (2) 15, p. 24 (1882, Jan.) angeführt werden, mit dem sich auch *J. Lüroth*, *Math. Ann.* 42 (1893), p. 457; 44 (1894), p. 539 beschäftigt: Zerfällt $f(z_1, \dots; x_1, x_2, \dots)$ in Bezug auf die z bei unbestimmten Parametern x , so lässt sich von f ein Faktor abspalten, der nur die z enthält, oder f kann mit Hülfe einer Gl., deren Koeffizienten linear in den x sind, in ein Produkt von gz. F. zerlegt werden, die einem und demselben Büschel angehören.

6. Elimination. Bézout'sche Methode. Sind allgemein m Gl. $f_1 = 0, \dots, f_m = 0$ von den Dimensionen n_1, n_2, \dots, n_m mit m Unbekannten z_1, \dots, z_m vorgelegt, so heisst (ξ_1, \dots, ξ_m) eine *Wurzel dieses Gleichungssystems*, wenn die Substitution $(z_1, \dots, z_m) = (\xi_1, \dots, \xi_m)$ alle Gl. $f_i = 0$ befriedigt. Es fragt sich, ob jedes System W. besitzt, wie viele, und wie sie bestimmt werden können.

Der *Bézout'sche* Satz besagt, dass im allgemeinen Falle W. existieren, und dass die Zahl dieser W. gleich dem Produkte $(n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_m)$

Weber, Netto. — Über die Reduktibilität vgl. den eingehenden Aufsatz von *W. Fr. Meyer*, *Math. Ann.* 30 (1887), p. 30, in welchem es sich um die Lösung folgenden Problems handelt: Sind $f_0(\lambda), \dots, f_d(\lambda)$ linear unabhängige, ganze F. von λ , so sollen die Grössen u_0, \dots, u_d als gz. F. von n Variablen $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ so bestimmt werden, dass $u_0 f_0 + u_1 f_1 + \dots + u_d f_d$ reductibel in λ wird. Siehe auch *W. Fr. Meyer*, *Münch. Ber.* 1885, p. 415.

10) Vgl. *M. Noether*, *Math. Ann.* 6 (1872), p. 351; *E. Bertini*, ib. 34 (1889), p. 450; *E. Netto*, *Acta math.* 7 (1885), p. 101; *D. Hilbert*, *Math. Ann.* 42 (1892), p. 320.

11) *J. f. Math.* 110 (1892), p. 104. Der Beweis stützt sich auf Reihenentwickelungen der Wurzeln; vgl. Nr. 10.

der Dimensionen n_1, n_2, \dots der gegebenen Gl. sei. Für den Fall $m = 2$ wurde das Theorem zuerst von C. Mac Laurin ausgesprochen¹²⁾; G. Cramer¹³⁾ und Euler¹⁴⁾ versuchten, Beweise für diesen Fall zu geben. Der erste, wenigstens seinem Principe nach ausreichende Beweis für den allgemeinen Satz wurde von Bézout geliefert¹⁵⁾; dieser erkannte zuerst und sprach es aus, „dass nicht eine allmähliche, sondern nur eine gleichzeitige Elimination von $(m - 1)$ der m Variablen zum richtigen Grade der *Endgleichung* oder der *Eliminante* führen könne“. Bei allmählicher Elimination treten nämlich stets fremde Lösungen auf¹⁶⁾. Bézout zeigt durch eine Konstantenabzählung (vgl. Nr. 1) die Möglichkeit, m gz. F. $\varphi_1, \varphi_2, \dots \varphi_m$ der Var. so zu bestimmen, dass die Summe

$$f_1 \varphi_1 + f_2 \varphi_2 + \dots + f_m \varphi_m = R(z_1)$$

von $z_2, z_3, \dots z_m$ frei wird. Die W. von $R(z_1) = 0$ geben dann die z_1 -Koordinaten der W. des Gleichungssystems. Die Bestimmung der φ_2 hängt von linearen Gl. ab, deren Anzahl diejenige der Unbekannten übertrifft. Aus einem besonderen, einfachen Falle wird dann die Auflösbarkeit des Systems der linearen Gl. erschlossen¹⁷⁾. J. Liouville¹⁸⁾ bemerkte zuerst, dass noch zur Vervollständigung der Methode zu beweisen bleibt, dass zu jeder einfachen W. ξ_1 von $R(z_1) = 0$ auch eine einzige W. $(\xi_1, \xi_2, \dots \xi_m)$ des Systems gehöre, und füllte diese Lücke aus. Bézout wendete (l. c.) seine Methode gleichfalls auf unvollständige Gl. und auf Gl. von besonderer Form an. Es ist dabei der Satz unerlässlich, dass jede gz. F. der W. so reduziert werden kann, dass ξ_1 höchstens bis zum Grade $(n_1 - 1)$, ferner ξ_2 höchstens bis zum Grade $(n_2 - 1), \dots$ aufsteigt¹⁹⁾.

Das obige $R(z_1)$ wird passend als *Eliminante* bezeichnet; natürlich kann sich die Bildung der Eliminate auf jede der Var. beziehen.

12) Geometria organica (Lond. 1720), Sect. V. Lemn. 3. Cor. 1.

13) Introduction à l'analyse etc. (Génève 1750.) Append. V.

14) Berl. Hist. 1748, p. 234—248.

15) Cours de math. à l'usage des Gardes du Pavillon, an. 1764/69, p. 209. — Théorie générale des équat. algèbr. (Paris 1779.)

16) Vgl. Netto, Algebra 2, 1, p. 98.

17) Vgl. C. Schmidt, Zeitschr. f. Math. 31 (1886), p. 214, wo nachgewiesen wird, dass dieser Schluss nicht ohne weiteres richtig ist, und wo eine Ergänzung desselben geliefert wird.

18) J. de Math. 6 (1841), p. 359. Auch die Liouville'schen Schlüsse bedürfen einer Präzisierung, die C. Schmidt ebenfalls (l. c.) giebt.

19) Serret-Wertheim, Algebra 1, § 69. Dieses Theorem lässt sich nicht, wie z. B. H. Laurent es unternimmt (Traité d'Algèbre, Paris 1894), durch allmähliche Elimination erledigen, und tritt in dieser Beziehung dem Bézout'schen Satze zur Seite.

7. Poisson'sche Methode. — Eliminante. *S. D. Poisson*²⁰⁾ veröffentlichte 1804 eine andere Methode, die er selbst in der Einleitung seiner Abhandlung für eine Erweiterung der von *Cramer* (I. c.) bei $m = 2$ benutzten erklärt. Er stützt sich bei der Durchführung der Elimination auf die Theorie der von *Ch. A. Vandermonde*²¹⁾ untersuchten symmetrischen F. mehrerer Reihen von Grössen (vgl. Nr. 25) und verwendet gleichzeitig den von *Cramer* (I. c.) eingeführten Begriff des Gewichtes (I B 2) einer F. — *Poisson* denkt sich die $(m - 1)$ ersten Gl. $f_i = 0$ nach z_2, z_3, \dots, z_m aufgelöst. Ihre W. $(\xi_{2x}, \xi_{3x}, \dots, \xi_{mx})$ werden sämtlich in f_m eingetragen, und da sie algebraische F. von z_1 sind, so wird das über alle W. erstreckte symmetrische Produkt

$$\prod f_m(z_1, \xi_{2x}, \xi_{3x}, \dots, \xi_{mx})$$

rational durch die Koeffizienten von f_1, \dots, f_m und durch z_1 darstellbar. Es ist dies die *Eliminante*. Schwierigkeiten treten bei der Ableitung dadurch auf, dass die ganzen symmetrischen F. der $(\xi_{2x}, \dots, \xi_{mx})$ gebrochene Ausdrücke der Koeffizienten von f_1, \dots, f_{m-1} werden, bei denen Potenzen einer nur von den Konstanten abhängigen gz. F. q_0 in den Nenner treten können.

8. Cayley'sche und Sylvester'sche Methode. *A. Cayley*²²⁾ hat die zweite *Euler'sche* Methode der Elimination bei einer Gl. einer Var. auf Systeme von Gl. mit mehreren Unbekannten auszudehnen versucht (vgl. I B 1 a Nr. 16). Er multipliziert in Erweiterung jener Methode sämtliche gegebenen F. f_i der Reihe nach mit allen Potenzprodukten aller Unbekannten von 0^{ter}, 1^{ter}, ... Dimensionen, bis er Gl. in solcher Anzahl erhält, dass sie die Anzahl der Potenzprodukte in denselben übertrifft, was nach den Abzählungen in Nr. 1 stets möglich ist. Betrachtet man die einzelnen Potenzprodukte als unabhängige Var., so entsteht ein System linearer Gleichungen; eliminiert man alle Potenzprodukte aus einer passenden Zahl dieser Gl., dann erhält man ein *Vielfaches der Eliminante*. Es kommt aber darauf an, sie selbst frei von fremden Faktoren darzustellen. Dies wird von *Cayley* auf folgende Frage der Theorie homogener, linearer Gl. hinausgespielt: „Zwischen n Unbekannten bestehen n_1 homogene lineare Gl.; zwischen deren Polynomen bestehen n_2 homogene lineare Relationen; zwischen deren Polynomen wiederum n_3 Relationen u. s. f.

20) J. Éc. Polyt. 4, Cah. 11 (an X), p. 199.

21) Par. Mém. 1772, II prt., p. 516 = Abhandlungen, deutsch von C. Itzigsohn, Berl. 1888, p. 85.

22) Cambr. Dubl. Math. J. 2 (1847), p. 52; ibid. 3 (1848), p. 116 = Coll. Pap. 1, p. 259, 370.

bis n_r . Dabei ist $n < n_1$; $n > n_1 - n_2$; $n < n_1 - n_2 + n_3$, \dots $n = n_1 - n_2 + n_3 - \dots \pm n_r$. Es sollen die charakteristischen Bedingungen dafür aufgesucht werden, dass das System durch n von 0 verschiedene Werte der Unbekannten befriedigt werden kann.“ *G. Salmon* giebt²³⁾ eine ungenügende Herleitung für das *Cayley'sche* Resultat; dies ist wahrscheinlich richtig, aber noch unbewiesen. Das Kriterium besteht in dem Verschwinden eines Quotienten aus zwei Determinantenprodukten. In dieser Gestalt tritt dann auch die reine Eliminate des Gl.-Systems bei *Cayley* auf.

*J. Sylvester*²⁴⁾ hat in anderer Art, aber gleichfalls nicht bindend, die Eliminations-Aufgabe für $m = 3$; $n_1 = n_2 = n_3$ und $m = 4$; $n_1 = \dots = n_4 = 2$ gelöst. Er ordnet die Terme in verschiedener Weise an, bildet lineare, homogene Gl. aus ihnen und zieht die Determinanten der Aggregate zu Hülfe. Es fehlt hierbei jedoch der notwendige Nachweis dafür, dass die erhaltenen Relationen von einander unabhängig seien²⁵⁾.

9. Kronecker'sche Methode. — Stufenzahl. *Kronecker*²⁶⁾ hat das Eliminations-Problem so aufgefasst, dass er über die Zahl der Gl. und die der Unbekannten keine Voraussetzungen macht, sondern die allgemeine Frage formuliert: Welche Einschränkungen üben die vorgelegten Gl. auf die sonst unbeschränkte Mannigfaltigkeit (z_1, z_2, \dots, z_m) aus? Dazu tritt die zweite Frage: Wie viele Gl. sind höchstens notwendig, um jede durch Gl. definierte Mannigfaltigkeit *rein* d. h. ohne fremde Punkte $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)$ darzustellen.

Die *Kronecker'sche* Methode geht so vor: Es wird $f_1 = R_1 F_1$, $f_2 = R_1 F_2, \dots, f_m = R_1 F_m$ gesetzt, wobei R_1 der gr. gm. T. der f sein mag; von vielfachen Faktoren soll stets abgesehen werden. Dann liefern die $F = 0$ nebst $R_1 = 0$ das Gleiche wie die $f_i = 0$, abgesehen von der Multiplizität der W. Mit Hülfe unbestimmter Parameter werden die beiden Gl. $u_1 F_1 + u_2 F_2 + \dots + u_m F_m = 0$ und $v_1 F_1 + v_2 F_2 + \dots + v_m F_m = 0$ gebildet, und aus beiden wird z. B. z_m eliminiert. Man

23) *Lessons introd. to the modern higher Algebra* (4. ed.). Dublin 1885, § 93.

24) *Cambr. Dublin Math. J.* 7 (1852), p. 68.

25) „Über e. Eliminations-Problem nach *Sylvester'scher* Methode behandelt“ siehe *Sylvester*, *Cambr. Math. J.* 2 (1841), p. 232. *Th. Muir*, *Edinb. Proc.* 20 (1895), p. 300. *Cayley*, *ibid.* 306 = Pap. 13, p. 545. Es handelt sich dabei um die Elimination aus den Gl. $ay^2 - 2c_1 xy + bx^2 = 0$, $bz^2 - 2a_1 yz + cy^2 = 0$, $cx^2 - 2b_1 zx + az^2 = 0$; und die Eliminate tritt als Diskriminante von $a\xi^2 + b\eta^2 + c\xi^2 + 2a_1 \eta\xi + 2b_1 \xi\xi + 2c_1 \xi\eta = 0$ auf.

26) *Grundzüge einer arithm. Theorie u. s. f. J. f. Math.* 92 (1882), p. 1. Vgl. auch die ausführlichen Erläuterungen von *J. Molk* (l. c.).

ordnet die Eliminate nach Potenzprodukten der u und v und bezeichnet die dabei auftretenden Koeffizienten mit g_1, g_2, \dots . Dann geben die so erhaltenen Gl. $g_i = 0$ dasselbe wie die Gl. $F_2 = 0$. Es wird nun wieder $g_1 = R_2 G_1, g_2 = R_2 G_2, g_3 = R_2 G_3, \dots$ gesetzt; auch hier wird von vielfachen Faktoren abgesehen. Dann sind die $f_i = 0$ durch $R_1 \cdot R_2 = 0$ nebst $G_1 = 0, G_2 = 0, \dots$ ersetzt, u. s. f. Hierdurch entsteht schliesslich die *Gesamteliminate* in der Form $R_1 \cdot R_2 \dots R_m = 0$, wobei $R_\alpha(z_1, \dots, z_{m-\alpha+1}) = 0$ eine Mannigfaltigkeit der α^{ten} Dimension liefert; diese einzelnen R_α sind die *Teileliminanten*. Die Gesamteliminate zerfällt also hierbei nach den Dimensionen aller verschiedenen durch die $f_i = 0$ gleichzeitig dargestellten Gebilde.

So kommt der Begriff der *Stufe des Modulsystems* f_1, f_2, \dots, f_n zu stande²⁷⁾. Es heisst ein System $f_1 = 0, f_2 = 0, \dots$ von der m^{ten} Stufe, wenn sämtliche Wurzeln feste Koordinaten haben, d. h. eine Mannigfaltigkeit 0^{ter} Dimension bilden. Das System heisst von der $(m-1)^{\text{ten}}$ Stufe, wenn die Wurzeln eine Mannigfaltigkeit erster Dimension ausmachen; kommen ausser dieser Mannigfaltigkeit, mit ihr verbunden noch einzelne W. mit festen Koordinaten vor, dann heisst das System *gemischt*, andernfalls ist es ein *reines* System. In gleicher Weise kann man weiter gehen. Vgl. Nr. 11.

Wie schon angedeutet wurde, leidet die *Kronecker'sche* Behandlung an dem Mangel, dass die Multiplizität der Lösungen nicht genügend berücksichtigt wird.

Auf die zweite der oben aufgeworfenen Fragen erhält man die Antwort, dass vermittelt $(m+1)$ Gl. jedes durch eine beliebige Anzahl von Gl. definierte Gebilde von m Var. *rein* dargestellt werden könne; es tritt natürlich $(m+1)$ nur als Maximalzahl auf. Ein Beispiel hierzu giebt für $m=3$ *K. Th. Vahlen*, J. f. Math. 103 (1891), p. 346.

10. Minding'sche Regel. — Labatie's Theorem. Nach diesen allgemeinen Erörterungen über Elimination wollen wir zwei für zwei Gl. $f_1 = 0, f_2 = 0$ mit zwei Var. wichtige Untersuchungen hervorheben. Zunächst gehen wir auf die *Minding'sche* Regel ein²⁸⁾. Diese Regel stellt den Grad der Eliminate bei gegebenen Gl. fest; sie stützt sich auf die Entwicklung aller einzelnen W. z_1 einer der Gl. etwa $f_1(z_1, z_2) = 0$, nämlich $\xi_{11}, \xi_{12}, \dots$ nach fallenden Potenzen von z_2 . Eine solche Entwicklung geschieht am einfachsten nach dem Schema,

27) *Kronecker*, Grundzüge § 20 u. § 21; J. f. Math. 99 (1886), p. 336. *J. Molk*, Acta math. 6 (1885), Chap. III.

28) J. f. Math. 22 (1841), p. 178; *ibid.* 31 (1846), p. 1; *L. J. Magnus*, *ibid.* 26 (1848), p. 365; *E. F. A. Minding*, *ibid.* 27 (1844) p. 379.

welches durch das *Newton'sche Polygon* gegeben wird²⁹). Meist reicht für den angegebenen Zweck die Kenntnis der Ordnung des Anfangsgliedes jeder Entwicklung aus. Hat man die ersten Glieder der Entwicklungen berechnet, dann liefert nach Substitution derselben in das *Poisson'sche* Produkt $f_2(\xi_{11}, z_2)f_2(\xi_{12}, z_2) \dots$ eine Abzählung den Grad der Eliminate nach z_2 . Man kann die Eliminate selbst berechnen, wenn man die Entwicklungen soweit benutzt, als in das Produkt positive Potenzen von z_2 eintreten. Die Bestimmung ist hier bequemer als bei den übrigen Methoden, welche sämtlich kompliziertere Rechnungen erfordern.

Eine andere Regel, welche *Minding* giebt (J. f. Math. 31), zeichnet sich dadurch vor der ersten aus, dass sie eine Formel liefert, welche die Koeffizienten von f_1 und f_2 symmetrisch enthält.

Das *Labatie'sche* Theorem³⁰) ist wichtig für die Elimination, weil es die Methode des gr. gm. T. benutzt, dabei aber die fremden Faktoren, welche bei den fortgesetzten Divisionen auftreten, wieder zu entfernen weiss (vgl. Nr. 5). Es tritt zugleich die Zerlegung der Eliminate in Faktoren ein. Die Methode gilt auch noch, wenn die beiden Gl. vielfache W. besitzen. Sie beruht auf folgendem: Sind $f_0(z_1, z_2)$, $f_1(z_1, z_2)$ die gegebenen F., so führt das Schema des gr. gm. T. nach z_1 auf eine Reihe von Gl. der Form:

$$f_\lambda \psi_\lambda = f_{\lambda+1} q_{\lambda+1} - f_{\lambda+2} \varphi_{\lambda+2} \quad (\lambda = 0, 1, 2, \dots),$$

in denen die f und die q gz. in z_1, z_2 ; die φ und die ψ gz. in z_2 und gebrochen in z_1 sind. Bezeichnet man den gr. gm. T. von

$$\psi_1, \varphi_3 \text{ mit } d_1; \text{ von } \frac{\psi_1 \psi_2}{d_1}, \varphi_4 \text{ mit } d_2; \text{ von } \frac{\psi_1 \psi_2 \psi_3}{d_1 d_2}, \varphi_5 \text{ mit } d_3; \dots$$

dann gilt der Satz, dass jede W. von $f_0 = 0$, $f_1 = 0$ auch eines der Systeme $f_\lambda = 0$, $\frac{\varphi_{\lambda+1}}{d_{\lambda+1}} = 0$ befriedigt, und dass umgekehrt die W. aller dieser Systeme auch sämtliche W. von $f_0 = 0$, $f_1 = 0$ geben.

²⁹) Opuscula ed. Castillon 1, p. 12 u. 39; Method of fluxions, ed. J. Colson, London 1736, § 29. Vgl. Br. Taylor, Method. incrementorum, Lond. 1715. — J. P. de Gua ersetzte das Parallelogramm durch ein Dreieck „le triangle algébrique“, Usage de l'Analyse, Paris 1740, p. 24ff.; G. Cramer, Introduct. à l'Analyse, Genève 1750, benutzt dasselbe als „triangle analytique“ (Chap. VII) und bezieht sich dabei (§ 92) auf *Newton* und *Stirling*, Lineae 3ⁱ ordinis, Oxon. 1717. — Vgl. die Darstellung von C. Jordan in seinem „Cours d'analyse“ 1, Paris 1882, p. 89; 2. Aufl. 1893, p. 90; von R. Baltzer, „Analyt. Geometrie“, Leipzig 1882, § 39, von F. Lindemann-A. Clebsch, Geometrie, Leipzig 1876, p. 331 und von E. Netto, Algebra 2, § 369.

³⁰) Méthode d'élimination par le plus grand commun diviseur. Paris 1835.

11. Vielfache und unendliche Wurzeln eines Gleichungssystems.

In die Behandlung des Eliminations-Problems führte gelegentlich *S. D. Poisson*³¹⁾ und später bei seinen Untersuchungen systematisch *J. Liouville*³²⁾ eine wesentliche Vereinfachung ein durch die Substitution einer Grösse x mittelst der Gl.

$$x = \kappa_1 z_1 + \kappa_2 z_2 + \cdots + \kappa_m z_m,$$

in welcher die κ unbestimmte Parameter bedeuten. Substituiert man nämlich x an Stelle einer der Var., z. B. an Stelle von z_1 in die vorgelegten Gl., und eliminiert aus ihnen z_2, \dots, z_m , so bleibt eine Eliminante R in x zurück. $R(x) = 0$ hängt in den Koeffizienten von $\kappa_1, \dots, \kappa_m$ ab; setzt man $\kappa_\alpha = 1$ und die übrigen κ gleich Null, so entsteht die Eliminante für z_α . Ist $R(x) = 0$ gelöst, wobei sich zeigt, dass $R(x)$ in lineare Faktoren nach $\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_m$ zerfällt, dann liefert dieselbe Substitution aus den W. x_1, x_2, \dots die W.-Koordinaten der z_α . Die Darstellung der $\xi_{1\alpha}, \xi_{2\alpha}, \dots, \xi_{m\alpha}$ aus x_α ist auch in der Form $\xi_{q\alpha} = H_\alpha(x_\alpha)$ möglich. Damit ist auch das dritte Problem aus Nr. 6 erledigt.

Die Einführung des x ist ausserdem dadurch von Wichtigkeit, dass $R(x)$ in relativ einfacher Weise die symmetrischen Funktionen der Grössen $\xi_{1\alpha}, \xi_{2\alpha}, \dots, \xi_{m\alpha}$, ($\alpha = 1, 2, \dots, k$) giebt, sobald man die Koeffizienten von $R(x)$ als Formen der $\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_m$ auffasst.

Ferner bietet sich bei der Einführung von $R(x)$ die Definition der Multiplizität einer W. des Systems von selbst dar. Hat $R(x) = 0$ eine q -fache W. $x = \xi$, so ist das zugehörige $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)$ eine q -fache Wurzel der Gl. $f_1 = 0, f_2 = 0, \dots, f_m = 0$; vgl. Nr. 17. — Ist $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)$ eine q_1 -fache W. von $f_1 = 0$, eine q_2 -fache W. von $f_2 = 0$, u. s. f., dann ist es eine mindestens $(q_1 \cdot q_2 \cdots q_m)$ -fache W. des gesamten Gl.-Systems³³⁾. Dieser Satz ist für die Theorie der Schnittpunkte bei geometrischen Gebilden von Wichtigkeit.

Über die verschiedenen Arten der „Multiplizität“ und ihre Unterscheidungen ist auf I B 1 a, Nr. 14 zu verweisen; die erwähnten Untersuchungen *J. J. Sylvester's*³⁴⁾ beziehen sich auch auf mehrere Var., zumal die Sätze über Evektanten (*Salmon, Higher Algebra* § 134, u. I B 2).

Die Anzahl der W. kann für besondere Systeme von Gl. nur dann unter die nach dem *Bézout'schen* Theorem vorhandene Anzahl

31) J. Éc. Polyt. Cah. 11 (an X), p. 199.

32) J. de Math. 12 (1847), p. 68.

33) Vgl. *P. Gordan-G. Kerschensteiner* 1, § 142, p. 148, wo die Forderung nach einer rein algebraischen Begründung dieses allgemeinen Satzes ausgesprochen ist. Dieser wird genügt bei *Netto, Algebra* 2, § 400 durch Einführung einer Erweiterung des Begriffes „Gewicht eines Terms“.

34) Phil. Mag. (4) 3 (1852), p. 375 u. p. 460.

$(n_1 \cdot n_2 \cdots n_m)$ sinken, wenn der erste Koeffizient von $R(x)$ oder mehrere der ersten verschwinden. In diesem Falle können und müssen wir wieder den Begriff von unendlich grossen W. einführen. Die Existenz solcher unendlich grossen W. fordert, dass die homogenen Gl., welche entstehen, wenn man bei allen $f=0$ nur die Glieder höchster Dimension beibehält, von $(0, \dots 0)$ verschiedene W. haben, vgl. Nr. 4. Erst *L. Euler*³⁵⁾ nimmt bei der Abzählung von W. sowohl auf die vielfachen als auch auf die unendlichen W. gebührende Rücksicht. Frühere Mathematiker wurden durch das Auftreten solcher Wurzeln vom Aussprechen des *Bézout'schen* Satzes zurückgehalten.

Es ist ferner möglich, dass die $f_i=0$ überhaupt keine W. haben; dies tritt ein, wenn sich $R(x)$ auf eine Konstante reduziert, und ist demnach so aufzufassen, als ob alle $(n_1 \cdot n_2 \cdots n_m)$ W. des allgemeinen Systems in diesem besonderen Falle unendlich gross geworden wären. Beispiele hierzu lassen sich leicht konstruieren, wie $f_1(z_1, z_2) = 0$, $f_2(z_1, z_2) \equiv f_1(z_1, z_2) + \text{const.} = 0$ zeigt.

Endlich ist die Möglichkeit vorhanden, dass die Gl. $f_i=0$ unendlich viele W. miteinander gemein haben. Charakteristisch ist dafür der Umstand, dass die Eliminate $R(x)$ identisch verschwindet. Es ist zu beachten, dass aus dem identischen Verschwinden von $R(x)$ nicht der scheinbar plausible Schluss gezogen werden kann, dass alle Koordinaten $z_1, z_2, \dots z_m$ unendlich viele Werte annehmen können. Die einschlägigen Verhältnisse klärt die *Kronecker'sche* Eliminations-Methode (Nr. 9) durch die Einführung der *Stufenzahl*, durch welche bei den Lösungen eines Systems, geometrisch gesprochen, die gemeinsamen Punkte, Kurven, Flächen u. s. w. getrennt werden. Entscheidend ist dabei folgendes: Das Gl.-System $f_i=0$ von m Unbekannten ist von der m^{ten} Stufe, wenn $R(x)$ nicht identisch verschwindet. — Das System wird von der $(m-1)^{\text{ten}}$ Stufe, wenn zwar $R(x) \equiv 0$ ist, aber bei unbestimmten z_m und bei der Elimination von $z_2, z_3, \dots z_{m-1}$ aus $(m-1)$ passend gewählten Gl. des Systems wenigstens ein $R_1(x, z_m)$ nicht identisch Null wird. Hierbei kann man dann die Unbekannte z_m beliebig wählen, x durch Lösung von $R_1=0$ bestimmen und dadurch die übrigen Koordinaten festlegen, so dass die W. eine Mannigfaltigkeit *erster Dimension* bilden; kommen ausser diesen keine anderen vor, so heisst das System der f_i ein *reines System* der $(m-1)^{\text{ten}}$ Stufe; kommen noch andere mit festen Koordinaten vor, dann heisst es ein *gemischtes System* dieser Stufe. In derselben Weise kann man fortgehen, wenn auch alle $R_i \equiv 0$ sind. Man lässt

35) Berl. Hist. 1748, p. 234.

dann nämlich z_{m-1} und z_m unbestimmt und eliminiert z_2, z_3, \dots, z_{m-2} aus je $(m-2)$ der Gl. $f_\lambda = 0$; u. s. f. — Bei diesem Verfahren ist eine vorläufige Transformation (vgl. Nr. 4) nötig, durch welche vermieden wird, dass etwa zu festen $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{m-1}$ unendlich viele Werte ξ_m gehören³⁶⁾.

R. Perrin untersucht mit Hilfe seiner Eliminantendarstellung (vgl. Nr. 14, Anm. 60) die Kriterien der verschiedenen Arten gemeinsamer, vielfacher Lösungen zweier Gleichungen mit einer, sowie dreier Gleichungen mit zwei Unbekannten³⁷⁾; er bestimmt also z. B., wann die Polynome $f_1(z)$ und $f_2(z)$ die Gestalten $f_1 = \alpha^2 \beta^2 \varphi_1$, $f_2 = \alpha^2 \beta \varphi_2$ annehmen, wobei α, β lineare Faktoren sind, und φ_1, φ_2 keinen gemeinsamen Teiler besitzen. In gleicher Weise wird eine ganze Reihe von Kriterien abgeleitet, und gleichzeitig wird die allgemeine Methode der Behandlung des Problems für m Var. gegeben.

W. End beschäftigt sich³⁸⁾ bei der Erweiterung eines Jacobi'schen Satzes (vgl. Nr. 22) mit dem Falle, dass die $f_i(z_1, z_2, z_3)$ ($i=1, 2, 3$) ausser für eine endliche Anzahl einzelner Werte noch für ein einfach unendliches Wertsystem verschwinden; geometrisch also mit dem Falle, dass drei Flächen ausser einer endlichen Anzahl diskreter Punkte noch eine Kurve gemeinsam haben.

12. Auflösung linearer Gleichungen. — Spezielle Eliminationsprobleme. Das einfachste Eliminations-Problem liefert die Aufgabe, m lineare Gl. für m Unbekannte aufzulösen; dies war der Ausgangspunkt für die Einführung und das Studium der Determinanten [I A 2]. Leibniz³⁹⁾ war der erste, welcher sich mit dieser Frage beschäftigte; ihm folgten Cramer⁴⁰⁾, Vandermonde⁴¹⁾ und Laplace⁴²⁾. C. G. J. Jacobi bespricht den allgemeinen Fall⁴³⁾, ohne auf alle möglichen Besonderheiten einzugehen; er erklärt dies (l. c. Ende von § 7) für ein „paullo prolixum negotium“. Weiter sind Cauchy⁴⁴⁾ und H. Grassmann⁴⁵⁾ zu erwähnen. Man überwindet alle Schwierigkeiten durch

36) „Grundzüge“ u. s. w. § 10. Ferner: J. f. Math. 99 (1886), p. 336. — Vgl. auch Molk l. c.

37) Par. C. R. 106 (1888), p. 1789; ibid. 107 (1888), p. 22 u. p. 219.

38) Math. Ann. 35 (1890), p. 82; Auszug aus e. Tübinger Dissertation (1887).

39) Brief an G. F. de l'Hôpital (1693); Acta Erudit. 1700, p. 200.

40) Introduction etc., Append. 1750.

41) Paris Mém. 1772, II part., p. 516.

42) Ibid. p. 294.

43) J. f. Math. 22 (1841), p. 285.

44) „Analyse algébrique“, Paris 1821, Chap. 3, § 2. — J. Éc. Polyt. Cah. 17 (1812), p. 69. — Résumés analytiques, Paris 1833, § 4, p. 19.

45) „Lineale Ausdehn.-Lehre“, Leipz. [1844] 1878, p. 71 u. 72.

die Einführung des Begriffes vom *Range*⁴⁶⁾ eines Systems aus $p \cdot q$ Grössen. *Baltzer*⁴⁷⁾ giebt *Kronecker's* erste Resultate in der vollständigen Behandlung des Problems; die späteren sind aus anderen Darstellungen⁴⁸⁾ zu entnehmen. Vielfach findet sich hierbei die Zurückführung des allgemeinen Problems auf homogene Gl. Das erscheint nicht zweckmässig, weil dadurch die Erkenntnis der Bedingungen für die Existenz *endlicher* Lösungen gehindert wird. Deshalb haben auch z. B. *P. Gordan*⁴⁹⁾ und *H. Weber*⁵⁰⁾ diese Fälle getrennt behandelt. Wir wollen eine Übersicht über die Lösung derart geben, dass umgekehrt die Behandlung homogener Gl. als besonderer Fall des allgemeinen erledigt wird⁵¹⁾.

Liegen die pq Grössen a_{ik} ($i = 1, 2, \dots, p$; $k = 1, 2, \dots, q$) vor, so heisst das System der a_{ik} vom *Range* r , wenn r die grösste Zahl ist, für welche nicht alle aus r Zeilen und r Spalten der a_{ik} gebildeten Determinanten verschwinden. In diesem Falle kann man die Grössen a_{ik} so angeordnet denken, dass die Determinante $D = |a_{ik}|$ ($i, k = 1, 2, \dots, r$) von Null verschieden ist. Sind nun p homogene lineare F. in den Unbekannten z_1, z_2, \dots, z_q mit jenen Koeffizienten a_{ik} gegeben:

$$f_\alpha = a_{\alpha 1} z_1 + a_{\alpha 2} z_2 + \dots + a_{\alpha q} z_q \quad (\alpha = 1, 2, \dots, p),$$

dann ist jedes f_α durch f_1, f_2, \dots, f_r linear und homogen darstellbar, wie die leicht ersichtliche Relation

$$|f_k \ a_{k1} \ a_{k2} \ \dots \ a_{kr}| = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, r; \alpha)$$

zeigt; denn der Koeffizient von f_α ist D , also $\neq 0$. Sollen nun

46) Diesen Begriff hat der Sache wie dem bezeichnenden Worte nach *G. Frobenius* eingeführt. Er hat seine Bedeutung bereits *J. f. Math.* 82 (1877), p. 290, § 3 „über lineare Gleichungen u. alternierende bilineare Formen“ ins rechte Licht gerückt. Die Bezeichnung „Rang“ ist von ihm zum ersten Male ib. 86 (1879), p. 1 benutzt: „Wenn in einer Determinante alle Unterdeterminanten $(m+1)^{\text{ten}}$ Grades verschwinden, die m^{ten} Grades aber nicht sämtlich Null sind, so nenne ich m den *Rang* der Determinante.“ — *Kronecker* hat (*Berl. Ber.* 1884, p. 1071, 1179) diesen von *Frobenius* bereits mehrfach durchgearbeiteten Begriff übernommen. Hiernach ist die Bemerkung *IA 2*, Nr. 24 nebst Anm. 91 richtig zu stellen. — *J. J. Sylvester* nennt *Amer. J. of Math.* 6 (1884), p. 271, *Lect.* 1 eine Determinante n^{ter} Ordnung, bei der alle Subdeterminanten $(n-i+1)^{\text{ter}}$ Ordnung verschwinden, aber nicht alle der $(n-i)^{\text{ten}}$ Ordnung, eine Determinante von der „Nullität“ (nullity) i .

47) *Baltzer*, *Determin.* 2. Aufl., *Leipz.* 1864, p. 60.

48) *J. für Math.* 99 (1886), p. 342.

49) *Gordan-Kerschensteiner* l. c., p. 101.

50) *Weber*, *Algebra* 1 (2. Aufl.), p. 97 u. p. 104.

51) *Kronecker* behandelt die linearen Kongruenzen ähnlich, *J. f. Math.* 99 (1886), p. 340.

die nicht homogenen Gl. $f_\alpha + a_{\alpha 0} = 0$ ($\alpha = 1, 2, \dots p$) erfüllbar sein, so muss auch das System a_{ik} ($i = 1, 2, \dots p$; $k = 0, 1, 2, \dots q$) vom Range r werden. Dann ergibt sich aus der Erfüllung der geforderten Gl. für $\alpha = 1, 2, \dots r$ die Erfüllung aller vorgelegten p Gleichungen.

Die Betrachtung der Determinante

$|a_{q1}z_1 + a_{q,r+1}z_{r+1} + \dots + a_{q,q}z_q + a_{q0}, a_{q2}, \dots a_{qr}| = 0$ ($q = 1, 2, \dots r$) zeigt, dass $(z_1 \cdot D)$ durch die willkürlich bleibenden $z_{r+1}, \dots z_q$ bestimmt wird. Das gleiche gilt für $(z_2 \cdot D), \dots (z_r \cdot D)$. Also hat das System eine Mannigfaltigkeit $(q - r)^{\text{ter}}$ Dimension von Lösungen. Man erkennt die enge Beziehung zwischen Rang und Stufenzahl.

Das gleiche gilt, wenn die $a_{\alpha 0} = 0$, also die Gl. homogen sind, nur dass die auf den Rang bezügliche Lösbarkeitsbedingung fortfällt. Wird dabei $q = r$, so müssen sämtliche z verschwinden. Ist $q = r + 1$, dann folgt die Proportionalität der $z_1, z_2, \dots z_q$ zu den entsprechenden ersten Subdeterminanten des Koeffizienten-Systems. —

Von weiteren Spezialuntersuchungen, die sich auf Elimination bei Gleichungen höherer Grade beziehen, mögen die folgenden erwähnt werden: Die Behandlung von drei Gleichungen zweiten Grades mit drei Unbekannten, welche O. Hesse⁵²⁾ durchgeführt und zum grossen Nutzen für die Geometrie auf das Studium der Kurven dritter Ordnung angewendet hat; ferner die von Serret⁵³⁾ ohne wesentlich neue Resultate gelieferte Diskussion der gleichen Aufgabe; endlich das von A. Clebsch⁵⁴⁾ wieder zu geometrischen Zwecken gelöste Problem der Elimination bei m homogenen Gleich., von denen $(m - 2)$ linear, eine quadratisch und die letzte von beliebigem Grade ist. Andere weitere Untersuchungen bietet die Geometrie reichlich dar; vgl. für darauf bezügliche Litteratur auch Anmerkung 57.

13. Eigenschaften der Eliminante. Bei der Poisson'schen, wie bei der Bézout'schen Methode zeigt sich, dass für allgemeine Gl.-Systeme mit unbestimmten Koeffizienten der Grad der Eliminante gleich dem Produkte der Dimensionen der Gl. des Systems wird (Bézout'scher Satz). Weiter bemerkt man, dass die Eliminations-Gl. $R(x) = 0$ für $x = \kappa_1 z_1 + \kappa_2 z_2 + \dots$ in den Koeffizienten der Funkt. f_1 homogen von einem Grade wird, welcher dem Produkte der Dimensionen der übrigen f gleichkommt. — Ferner ist R „isobarisch“ von einem Gewichte gleich dem Produkte der Dimensionen der m Funk-

52) J. f. Math. 28 (1844), p. 68 = Werke p. 89.

53) Algèbre supérieure 1, § 70 ff.

54) J. f. Math. 58 (1861), p. 273.

tionen f_λ (IB 2). — Der Grad von R kann nur durch das Verschwinden der ersten Koeffizienten in R verringert werden. Sind nun q_0, q_1, \dots diese Koeffizienten der höchsten Potenzen von x in R , so sagt $q_0 = 0$ aus, dass die m homogenen Gl., welche entstehen, wenn man in jedem $f_\lambda = 0$ die Glieder höchster Dimension beibehält, eine von $(0, \dots, 0)$ verschiedene W. haben, oder mit anderen Worten, dass das System $f_\lambda = 0$ unendlich grosse W. besitzt. — Bei allgemeinen Gl. $f_\lambda = 0$ ist R irreduktibel⁵⁵⁾, und bei ihnen ist $q_0 \neq 0$. Werden bei einer besonderen Gl. $q_0 \equiv 0, q_1 \equiv 0, \dots, q_{\mu-1} \equiv 0$, so ist jeder von $\kappa_1, \kappa_2, \dots$ abhängige Faktor des q_μ in $q_{\mu+1}, q_{\mu+2}, \dots$ als Teiler enthalten⁵⁶⁾. — Die Eliminate von

$$f_1 = 0; f_2 + q_{2,1} f_1 = 0; f_3 + q_{3,2} f_2 + q_{3,1} f_1 = 0; \dots$$

stimmt mit derjenigen von $f_1 = 0, f_2 = 0, f_3 = 0, \dots$ überein für beliebige gz. F. $q_{\alpha\beta}$; gleichwohl besitzt das erste System gegenüber dem zweiten im allgemeinen noch unendliche Wurzeln. — Bei der *Poisson'sche* Methode ergibt sich stets das gleiche R , welche der Gleichungen man auch an das Ende setzen und bei der Produktbildung benutzen mag.

Ein Theorem von *Liouville* ist von Bedeutung für die Geometrie geworden; ihm zufolge sind die ersten Koeffizienten der Eliminate nur von gewissen ersten Koeffizienten der einzelnen F. abhängig; es bleibt bei Änderung der übrigen Gl.-Koeffizienten eine von jenen abhängige Reihe von Eliminations-Eigenschaften ungeändert, deren geometrische Bedeutung verwertet werden kann⁵⁷⁾.

14. Resultante und ihre Eigenschaften. Sind $(m+1)$ Gleichungen $f_\alpha = 0$ ($\alpha = 0, 1, \dots, m$) zwischen den m Unbekannten z_1, z_2, \dots, z_m gegeben; bestimmt man sämtliche W. ($\xi_{1x}, \xi_{2x}, \dots, \xi_{mx}$) der letzten m von diesen Gl.; setzt man diese W. in f_0 ein und nimmt das Produkt aller $f_0(\xi_{1x}, \dots, \xi_{mx})$; multipliziert man endlich dieses Produkt mit der einfachsten Konstanten, welche es zu einer gz. F. der Koeffizienten macht, so erhält man eine ganze F. der Gleichungskoeffizienten, deren Verschwinden charakteristisch für das Bestehen

55) *Laurent*, Traité d'Algèbre 4 (Compléments), Paris 1894, und *Netto*, Algebra 2, 1, p. 79.

56) *Netto* l. c., 2, p. 86.

57) *Liouville*, J. de Math. (1), 6 (1841), p. 359. Weitere Arbeiten hierüber lieferten: *E. Laguerre*, Par. C. R. 60 (1865), p. 71; Bull. soc. math. 8 (1879), p. 52; *G. Humbert*, J. de math. (4), 3 (1887), p. 327; 5 (1889), p. 81 u. 129; 6 (1890), p. 233; *G. Fouret*, Nouv. Ann. (3), 9 (1890), p. 258; *J. Hadamard*, Acta math. 20 (1896), p. 201.

gemeinsamer W. der $(m+1)$ Gl. $f_\alpha = 0$ ist. Diese Funkt. heisst „die Resultante (Res.) der $(m+1)$ Gleichungen“⁵⁸⁾. — Macht man die Gl. $f_\alpha = 0$ durch Einführung einer $(m+1)^{\text{ten}}$ Var. u homogen, dann ist die Eliminate derselben nach u gleich jener Res., abgesehen von einer Potenz von u als Faktor. — Fasst man in den $f_\alpha = 0$ die Koeffizienten als gz. F. einer neuen Var. z_0 auf, dann ist die Res., wie sie für die m Var. definiert wurde, die Eliminate nach z_0 ; der Unterschied von Res. und Eliminate liegt in der Auffassung der Koeffizienten als Konstante oder als gz. F. einer weiteren Var. Daher finden viele Eigenschaften der Eliminate (aus Nr. 13) hier ihre Analoga.

Mertens⁵⁹⁾ giebt in Parallele zu der Bézout'schen Formel eine Ableitung der Result., welche von der Verwendung des Eliminationsprozesses absieht, indem er, falls die $f_\alpha = 0$ keine gem. W. haben, die Existenz eines bestimmten linearen, homogenen Aggregates der Polynome f_0, f_1, \dots von gewissen Gradeigenschaften nachweist, welches die Var. nicht mehr enthält.

Hinsichtlich dieser Form $R = \sum f_i \varphi_i$ weist R. Perrin⁶⁰⁾ nach, dass die Multiplikatoren φ_i als gz. F. der gegebenen F. f_α gewählt werden können. Er benutzt den Umstand, dass, wenn g_0, g_1, \dots die Werte sind, die f_0, f_1, \dots für ein willkürliches Var.-System annehmen, dann die Gl. $f_\alpha - g_\alpha = 0$ gemeinsame W. und also eine verschwindende Res. haben; da diese in den Koeffizienten der $(f_\alpha - g_\alpha)$ ganz ist, so folgt daraus der Satz.

Bei der obigen Poisson'schen Produktform der Res. nimmt f_0 eine Ausnahmestellung ein; es giebt demgemäss, je nach der Wahl der ersten Gl. $(m+1)$ verschiedene Formen der Res., deren Übereinstimmung nicht so einfach zu erkennen ist, wie bei $m=1$. Mit diesen verschiedenen Formen beschäftigt sich O. Biermann⁶¹⁾ und eingehender J. Hadamard⁶²⁾.

Eine ausführliche Theorie der Res. findet man in einer umfangreichen Abhandlung von L. Schläfli⁶³⁾, der zu früher bekannten Eigenschaften neue hinzufügt. Er zeigt z. B., dass wenn f_1, f_2, \dots nume-

58) Es erscheint nicht unpassend, im Anschluss an englische Autoren die sonst unterschiedlos gebrauchten Bezeichnungen „Eliminate“ und „Resultante“ begrifflich so zu trennen, wie hier geschehen ist.

59) Wien. Ber. 93 (1886), p. 527.

60) Par. C. R. 106 (1888), p. 1789.

61) Monatsh. f. Math. u. Phys. 5 (1894), p. 17.

62) Acta math. 20 (1896), p. 201.

63) Wien. Denkschr. 1852, Abt. 2, p. 1.

rische Koeffizienten haben, R in lineare Faktoren zerfällt, die in den Koeffizienten von f_0 ganz sind; er fasst die z als rationale F. anderer Var. $y_1, y_2, \dots y_m$ auf; er untersucht die Struktur der Res.; er stellt gewisse partielle Differential-Gl. her, denen die Res. genügen, u. s. f. — Eine in dem oben, Anm. 52, zitierten Aufsätze von *Hesse* angedeutete allgemeine Eliminationsmethode wird von *Schläfli* [p. 9] als unzureichend nachgewiesen.

*K. Th. Vahlen*⁶⁴⁾ setzt die Koeffizienten der f_α gleich gz. F. einer zweiten Variablenreihe und untersucht die Dimension der Res. in diesen; es ist das erlangte Resultat für die Theorie der algebraischen Korrespondenzen wichtig.

Die Berechnung von Resultanten nach den angegebenen Methoden ist sehr umständlich. Einige Erleichterung gewährt die Benutzung der eben erwähnten Differentialgleichungen für die Herstellung der numerischen Koeffizienten. — *P. Gordan* hat⁶⁵⁾ die Resultanten ternärer Formen allgemein invariantiv, d. h. durch Überschiebungen dargestellt (I B 2).

Über die Teilbarkeit von Result. verweisen wir auf die in I B 1 a Nr. 19 gegebenen Auseinandersetzungen. Ebendort findet man die Litteraturangaben.

15. Reduzierte Resultante. Die in I B 1 a Nr. 14 gemachte Bemerkung über die *Cayley'sche „reduzierte Resultante“* gehört auch hierher. — Ferner sind hier (und auch dort) noch andere von *A. Brill* gemachte Untersuchungen⁶⁶⁾ zu erwähnen. Haben m Gleichungen von $(m - 1)$ Var. eine bestimmte Anzahl von W. gemeinsam, dann kann man nach den Bedingungen fragen, unter denen die Gl. noch eine weitere gemeinsame W. besitzen. Diese Bedingungen werden durch das Verschwinden der sogenannten „*Brill'schen reduzierten Resultante*“ gegeben. Die Existenz eines solchen Gebildes wird begründet; seine Konstitution wird untersucht; dasselbe wird als gm. T. gewisser Glieder einer Entwicklung erkannt, die durch einen einfachen Algorithmus hergestellt werden kann; seine Wichtigkeit für Fragen der Geometrie wird nachgewiesen.

16. Reduktibilität und Teilbarkeit von Gleichungssystemen. In der *Kronecker'schen* Eliminations-Theorie heisst ein F.- oder ein Gl.-System irreduktibel oder reduktibel, wenn die Gesamteliminante

64) J. f. Math. 113 (1894), p. 348.

65) Math. Ann. 50 (1898), p. 113; J. de math. (3), 5 (1897), p. 195; Züricher Kongress (1898), p. 143.

66) Math. Ann. 4 (1871), p. 510; Münch. Abhandl. 17 (1892), p. 89.

(Nr. 9) es ist. Es folgt die Zerlegung eines reduktiblen Systems in irreduktible; ebenso die Begriffe des Teilers eines Gl.-Systems, der teilerfremden Systeme und des gr. gm. T. zweier Systeme. Es ist zu bemerken, dass Analogieschlüsse gegenüber den F. einer Var. nur mit Vorsicht zu verwenden sind. *J. Molk*⁶⁷⁾ hat analytisch diese Ideen behandelt, die in der Raumgeometrie bereits geläufig waren.

17. Diskriminante eines Gleichungssystems. Eine Erweiterung des Begriffes der *Diskriminante* (Diskr.) einer Gl. $f(z) = 0$ mit einer Var. kann auf verschiedene Arten für mehrere Var. durchgeführt werden, je nachdem man für eine solche Verallgemeinerung diese oder jene Eigenschaft der Diskr. einer Gl. mit einer Unbekannten benutzt. Für $f(z) = 0$ drückt das Verschwinden der Diskr. die Bedingung aus, dass die Gl. vielfache W. besitze. Ist ein Gl.-System $f_\alpha = 0$ ($\alpha = 1, 2, \dots m$) mit den Unbekannten $z_1, \dots z_m$ gegeben, so kann man ebenso fragen, wann eine W. ($\xi_1, \dots \xi_m$) als vielfache W. der Gl. gilt. Eine solche Bedingung ist Nr. 11 im Anschluss an die Eliminate $R(x)$ angeführt: $R(x) = 0$ muss eine vielfache W. haben. Eine andere folgt daraus, dass die *Funktionaldeterminante*⁶⁸⁾ (Funkt.-Det.)

$$J(z_1, \dots z_m) = \frac{\partial(f_1, \dots f_m)}{\partial(z_1, \dots z_m)} = \begin{vmatrix} f_1 & \dots & f_m \\ z_1 & \dots & z_m \end{vmatrix} = \left| \frac{\partial f_\alpha}{\partial z_\beta} \right| \quad (\alpha, \beta = 1, 2, \dots m)$$

für ($\xi_1, \dots \xi_m$) verschwindet. Bildet man nämlich das über alle W. des Systems erstreckte Produkt $\prod J(\xi_{1x}, \xi_{2x}, \dots \xi_{mx})$, so wird dies eine rationale F. der Koeffizienten, welche nur verschwindet, wenn das System $f_\alpha = 0$ mindestens eine mehrfache W. besitzt. In dem sogenannten allgemeinen Falle, in dem die Zahl der W. gleich dem Produkte der Gl.-Dimensionen ist, kann jenes Produkt bis auf einen konstanten Faktor in das Quadrat einer Determinante umgewandelt werden, deren Elemente Potenzprodukte der W. sind. Es tritt also eine Analogie mit den Gl. $f(z) = 0$ einer einzigen Unbekannten auf⁶⁹⁾, wo die Ableitung der F. an der Stelle der hier auftretenden Funkt.-Det. erscheint; vgl. I B 1 a Nr. 20.

18. Diskriminante einer Gleichung. Dieser Erweiterung steht eine zweite zur Seite, welche an eine andere Diskr.-Eigenschaft bei

67) *Molk* (l. c.) Chap. 5, § 3, p. 155. Vgl. auch *Netto*, Algebra 2, 1 § 435.

68) Eingeführt von *Jacobi*, J. f. Math. 22 (1841), p. 319 — Werke 3, p. 193; vgl. Nr. 19 u. 20. Die Engländer bezeichnen sie nach *Cayley*, J. f. Math. 52 (1856), p. 276 = Coll. Pap. 4, p. 30 als „Jacobian“. Die zweite Schreibweise im Text stammt von *W. F. Donkin*, Phil. Trans. 1854, 1, p. 72; die dritte von *Gordan-Kerschensteiner* 1, p. 121; *Hesse* gebraucht gelegentlich eine noch kürzere, nämlich: $(f_1, \dots f_m)$.

69) *H. Laurent*, Traité d'analyse, Paris 1885, 1, p. 305.

Gl. mit einer Var. anknüpft. Man legt am einfachsten eine homogene F. $\varphi(z_1, z_2, \dots, z_m)$ zu grunde, und bezeichnet die Res. der n ersten Ableitungen $\frac{\partial \varphi}{\partial z_1}, \frac{\partial \varphi}{\partial z_2}, \dots, \frac{\partial \varphi}{\partial z_m}$ als *Diskriminante*⁷⁰⁾ von φ (Diskr.).

Verschwindet die Diskr. für irgend einen Punkt des Gebildes $\varphi = 0$, so ist dies ein *singulärer Punkt*; ein solcher lässt, geometrisch gesprochen, mehr als eine Tangentialebene zu. Hierin liegt gleichfalls eine Verallgemeinerung der Diskr.-Eigenschaft der F. mit einer Var. Hat φ die Dimension n , so ist die Diskr. in den Koeffizienten von φ homogen von der Dimension $m(n-1)^{m-1}$ und hat das Gewicht $n(n-1)^{m-1}$.⁷¹⁾ Ferner besitzt sie Invarianteneigenschaft [I B 2].

Ist φ eine homogene, nicht lineare F. anderer F. g_1, g_2, \dots der Var., und sind die F. derart, dass das System $g_\alpha = 0$ unendlich viele W. besitzt, dann verschwindet die Diskr. von φ identisch. — Hat φ nur einen einzigen singulären Punkt, so kann dieser durch Differentiation der Diskr. gefunden werden⁷²⁾, vgl. I B 1 a, Nr. 21.

19. Unabhängigkeit von Funktionen. Sind q F. von m Var. z gegeben $f_\alpha(z_1, \dots)$, so heissen sie *von einander unabhängig*⁷³⁾, wenn keine rationale Gl. $F(f_1, \dots, f_q) = 0$ besteht, deren Koeffizienten von den Var. unabhängig sind, und die nicht für beliebige Werte von f_1, \dots, f_q , also nicht identisch erfüllt ist. Ist $q > m$, dann giebt es stets solche Gl. $F = 0$, d. h. $q > m$ F. f_α sind nie von einander unabhängig. Ist $q \leq m$, dann bestimme man alle Eliminantens für je $(q-1)$ Var. aus den q Gl. $f_\alpha(z_1, \dots) - \varphi_\alpha = 0$, in denen die φ_α Symbole für die f_α sind; wird eine dieser Eliminantens von den übrigen Var. unabhängig, dann und nur dann bilden die f_α ein abhängiges F.-System; diese Eliminante geht für $\varphi_\alpha = f_\alpha$ in eine Relation $F = 0$ über⁷⁴⁾. *Jacobi* hat (l. c.) folgendes Kriterium anderer Art für die Unabhängigkeit eines F.-Systems in dem Falle $m = q$ aufgestellt: Die charakteristische Bedingung für die Abhängigkeit besteht in dem identischen Verschwinden von $J = \frac{\partial(f_1, \dots, f_m)}{\partial(z_1, \dots, z_m)}$. Dieses Kriterium beschränkt sich nicht auf den Fall, dass die f_λ gz. F. der Var. sind.

70) Von *Hesse* (l. c.) und *Schläfli* (l. c.) als Determinante der F. φ bezeichnet.

71) Diese und die folgenden nebst weiteren Eigenschaften hat *Schläfli* (l. c.) angegeben.

72) Offenbar sind beide in den Nrn. 17 und 18 gegebenen Erweiterungen nur die Grenzfälle einer allgemeinen, die sich auf willkürliche Gl.-Systeme bezieht. Ihre Behandlung steht noch aus.

73) *Jacobi*, J. f. Math. 22 (1841), p. 319 = Werke 3, p. 393.

74) *Netto*, Algebra 2, 1.

20. Unabhängigkeit von Gleichungen. *Jacobi* definiert (l. c.) Gleichungen $f_1 = 0, \dots, f_q = 0$ als unabhängig oder als abhängig von einander, je nachdem es möglich oder unmöglich ist, aus ihnen q der Unbekannten ($m \geq q$) durch die übrigen auszudrücken. Statt dessen kann man sagen: $f_q = 0$ heisst dann und nur dann abhängig von $f_1 = 0, \dots, f_{q-1} = 0$, wenn jede W. dieses letzten Systems auch $f_q = 0$ befriedigt (vgl. dazu Nr. 5).

21. Funktionaldeterminante. Die F. J spielt in der Theorie der F. mehrerer Var. eine ähnlich bedeutende Rolle, wie die Ableitung $f'(z)$ bei einer F. $f(z)$ einer Var. *Jacobi* hat sie eingeführt und analytisch erforscht⁷⁵). *Bertrand*⁷⁶) giebt von ihr folgende Definition, deren Charakter als Erweiterung der Ableitung klar ist: er setzt statt eines Differential-Quotienten den Quotienten von zwei mit m Differentialen gebildeten Determinanten m^{ter} Ordnung $J = |\partial_x f_\lambda| : |\partial_x z_\lambda|$, wobei die f Funktionen, ferner die z Variable und d_1, \dots, d_m von einander unabhängige Inkremente bedeuten. — *Jacobi* leitet die Bildung von J bei explicit und implicit gegebenen F., sowie bei F. von F. ab; er untersucht den Einfluss linearer Substitutionen; er zeigt ihre Bedeutung bei der Transformation mehrfacher Integrale [II A 2, Nr. 41]. — Die Funkt.-Det. J von m homogenen Gl. $\varphi_\alpha = 0$ mit m Unbekannten verschwindet für jede W. des Gl.-Systems. — Sind die homogenen F. φ_α dabei von gleichen Dimensionen, dann verschwinden auch die Ableitungen von J für jede W.⁷⁷). — Stets dann und nur dann, wenn J als homogene lineare F. der homogenen φ_α dargestellt werden kann, haben die Gl. eine von $(0, 0, \dots, 0)$ verschiedene W. gemein⁷⁸). — Ist eine solche Darstellung bei beliebigen Gl. $f_\alpha = 0$ für die Funkt.-Det. derjenigen homogenen Gl. $\varphi_\alpha = 0$ möglich, welche durch Nullsetzen der Terme höchster Dimension der f_α entstehen, so haben die $f_\alpha = 0$ weniger als $n_1 n_2 \dots n_m$ endliche W. — Sind $(m+1)$ homogene Gl. $\varphi_\alpha = 0$ gleicher Dimension mit m Unbekannten gegeben, bildet man aus je m unter ihnen die Funkt.-Det. J_1, J_2, \dots, J_{m+1} ; ferner aus je m der F. J_λ die Funkt.-Det. I_1, I_2, \dots, I_{m+1} , dann ist $I_\alpha = M \varphi_\alpha$, wo M einen von α unabhängigen Wert besitzt⁷⁹).

Zu erwähnen ist die Behandlung der Funkt.-Det. von *Gordan*

75) J. f. Math. 22 (1841), p. 319 = Werke 3, p. 393.

76) J. L. F. Bertrand, J. de math. 16 (1851), p. 213. [Der Satz wird von „Genocchi-Peano“, dtsch. Ausg. (s. II A 2), Anm. zu Nr. 122, p. 329 angefochten.]

77) Hesse, J. f. Math. 28 (1844), p. 68 = Werke, p. 87.

78) Kronecker, Berl. Ber. 1859, Dez.-Heft, p. 687.

79) Clebsch, J. f. Math. 69 (1868), p. 355; ibid. 70 (1869), p. 175 wird auf Grund einer Mitteilung von *Gordan* die Grösse M bestimmt.

Kerschensteiner (l. c. p. 120 ff.), bei der besonders gewisse Ähnlichkeiten mit Brüchen hervorgehoben werden. So ist (vgl. die Bezeichnung der vorigen Nummer)

$$\begin{pmatrix} y_1 & y_2 & \dots & y_m \\ x_1 & x_2 & \dots & x_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 & z_2 & \dots & z_m \\ y_1 & y_2 & \dots & y_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_1 & z_2 & \dots & z_m \\ x_1 & x_2 & \dots & x_m \end{pmatrix}.$$

Ebenda werden die Subdeterminanten der Funkt.-Det. wieder als Funkt.-Det. dargestellt; die Funkt.-Det. wird als Produkt partieller Differentialquotienten gegeben u. s. w.

Auch in der Theorie der Charakteristiken (vgl. Nr. 25) nimmt die Funkt.-Det. eine wichtige Stellung ein, indem sie die Ausdehnung gewisser Sätze über Wurzeln einer Gl. auf Systeme von Gl. ermöglicht. (Vgl. I B 3 a, Nr. 7, sowie III A 4.)

22. Hesse'sche Determinante. Ist jedes $f_\alpha = \frac{\partial F}{\partial z_\alpha}$, wobei F eine homogene gz. F. der Var. z_1, z_2, \dots bedeutet, dann wird J zur symmetrischen Determinante der zweiten Ableitungen von F , nämlich gleich $H = \left| \frac{\partial^2 F}{\partial z_\alpha \partial z_\lambda} \right|$; sie heisst die *Hesse'sche Determinante*⁸⁰). *O. Hesse* hat sie eingeführt und ihre Bedeutung für verschiedene Fragen der Geometrie erkannt. Führt man in eine homogene Funkt. F statt der z_1, z_2, \dots, z_m durch lineare homogene Substitutionen andere Variable y_1, y_2, \dots, y_m ein, und ist eine solche Wahl der y möglich, dass F von höchstens $(m - 1)$ der neuen Variablen abhängig wird, dann ist $H \equiv 0$. *Hesse* versuchte die Umkehrung dieses Satzes zu beweisen⁸¹), *M. Pasch* begründete ihre Gültigkeit für kubische Formen von drei und vier Var.⁸²), *Gordan* allgemein für ternäre, *Noether* für quaternäre Formen⁸³). Endlich wurde von *Gordan* und *Noether* gezeigt⁸⁴), dass im allgemeinen Falle die Umkehrung des Satzes nicht richtig sei [I B 2, Nr. 27].

Die *Hesse'sche* Grundform H steht in engen Beziehungen zur F , deren ausgezeichneten und singulären Punkten. Ist etwa (ξ_1, ξ_2, \dots) eine k -fache Nullstelle für F , so ist sie zugleich eine $(3k - 4)$ -fache für H , und $F = 0, H = 0$ haben k „Tangenten“ in (ξ_1, ξ_2, \dots) gemeinsam. Bei $k = 2$ z. B. fallen (geometrisch gesprochen) in diesem

80) *Hesse*, J. f. Math. 28 (1844), p. 68; die Engländer bezeichnen sie nach *Cayley* (Phil. Transact. 146 [1856], p. 627 = Coll. Pap. 2, p. 627) als *Hessian*. Vgl. auch *J. J. Sylvester*, Cambr. Dubl. M. J. 6, 1851, p. 194.

81) J. f. Math. 42 (1851), p. 117 u. ibid. 56 (1859), p. 263 = Werke p. 289, 481.

82) ibid. 80 (1875), p. 169.

83) Erlang. Ber. 1875, 13. Dez.

84) Math. Ann. 10 (1876), p. 547.

Punkte die Tangenten von $F=0$ mit denen von $H=0$ zusammen, so dass dieser Punkt als Lösung von $F=0$, $H=0$ sechsfach zählt⁸⁵⁾.

23. Jacobi's Erweiterung einer Euler'schen Formel. Die Analogie zwischen der Funkt.-Det. J und der Ableitung bewährt sich auch bei einem von *Jacobi* gefundenen Satze⁸⁶⁾, welcher als eine Erweiterung der *Euler'schen* Formeln (vgl. I B 1 a Nr. 2) zu bezeichnen ist. Bedeutet $g(z_1, \dots, z_m)$ eine gz. F. der Var. z_α von einer Dimension $\mu < (\sum n_\alpha - m)$, dann gilt für die über alle W. $(\xi_{1k}, \dots, \xi_{mk})$ des Systems $f_\alpha = 0$ ($\alpha = 1, 2, \dots, m$) erstreckte Summe

$$\sum_k \frac{g(\xi_{1k}, \dots, \xi_{mk})}{J(\xi_{1k}, \dots, \xi_{mk})} = 0,$$

vorausgesetzt, dass $k = n_1 \cdot n_2 \cdots n_m$ wird, d. h. dass die Gl. $f_\alpha = 0$ überhaupt nur endliche (und von einander verschiedene) W. besitzen⁸⁷⁾.

Dieses Theorem ist auf mancherlei Arten bewiesen worden. *Jacobi* und nach ihm *E. Betti*⁸⁸⁾ leiten es (für ein beliebiges m) aus der Theorie der symmetrischen Funktionen mehrerer Variablenreihen her; *Kronecker* (l. c.) schliesst es aus seiner Verallgemeinerung der *Lagrange'schen* Interpolationsformel; *J. Liouville*⁸⁹⁾ folgert es aus der Bemerkung, dass die Eliminante sich nicht ändert, wenn die Folge der F. bei dem *Poisson'schen* Verfahren geändert wird. — *Liouville* erhält in seiner Arbeit eine scheinbar allgemeinere Formel; doch lässt sich diese aus der *Jacobi'schen* einfach dadurch herleiten, dass für eine der F. f_α ein Produkt zweier F. eingesetzt wird⁹⁰⁾.

85) Von der reichhaltigen, hierher gehörigen Litteratur führen wir an: *Hesse*, J. f. Math. 28 (1844), p. 68 u. 97 = Werke p. 89, 123; *ibid.* 38 (1849), p. 257 = Werke p. 211; *ibid.* 40 (1850), p. 316 = Werke p. 257 (Brief an *Jacobi* nebst Antwort); *ibid.* 41 (1851), p. 272 = Werke p. 263; *Clebsch*, J. f. Math. 58 (1861), p. 229; *Cayley*, J. f. Math. 34 (1847), p. 30 = Coll. Pap. 1, p. 337; *Clebsch-Lindemann*, Geometrie 1, p. 176, 191, 206 u. s. w.

86) J. f. Math. 14 (1835), p. 281 = Werke 3, p. 285, wo zunächst $m=2$ angenommen ist. Die Erweiterung auf beliebige m giebt dann *Jacobi*, J. f. Math. 15 (1836), p. 285, § 6—10 = Werke 3, p. 329; ferner *E. Betti*, Ann. di mat. 1 (1853), p. 1 und *Clebsch*, J. f. Math. 63 (1863), p. 189.

87) *Kronecker*, Berl. Ber. 1865, Dez., p. 687 = Werke 1, p. 133 hat diese Einschränkung betont; übrigens hat *Jacobi* selbst ihre Nothwendigkeit erkannt, wie sich sowohl aus der Arbeit J. f. Math. 15 (1836), p. 285 indirekt, als auch direkt aus einer Bemerkung in *Jacobi's* Nachlass, abgedruckt: Werke 3, p. 610, ergibt.

88) Ann. di mat. 1, 1858 [I B 3 b, Nr. 24].

89) J. de math. 6 (1841), p. 345 und Par. C. R. 13 (1841), p. 467.

90) *A. Harnack*, Math. Ann. 9 (1896), p. 371; vgl. *Clebsch-Lindemann*, Vorles. üb. Geom. 1, p. 826.

24. Wurzelrelationen eines Gleichungssystems. — Interpolation.

An anderer Stelle zeigt *Jacobi*⁹¹⁾, dass die eben erhaltenen Summenrelationen, wenn in ihnen für g der Reihe nach alle Potenzprodukte $(z_1^\alpha z_2^\beta \dots z_m^\delta)$ eingesetzt werden ($\alpha + \beta + \dots + \delta < \sum n_\alpha - m$), nicht sämtlich von einander unabhängig sein können. Die hierbei auftretenden Relationen werden von ihm für $m = 2$, $n_1 = n_2$ genauer untersucht. Die sich anschliessenden allgemeinen Fragen hängen mit dem schon von *Euler*⁹²⁾ und *Cramer*⁹³⁾ bemerkten Umstände zusammen, dass die $n_1 \cdot n_2 \dots n_m$ Schnittpunkte von $f_1 = 0, \dots, f_m = 0$ nicht willkürlich gewählt werden dürfen, da ihre Anzahl grösser ist, als die zur Bestimmung eines f_α verfügbaren Konstanten, d. h. als die Koeffizientenanzahl (vgl. Nr. 1 Anm. 2). Es knüpften *J. Plücker*⁹⁴⁾ und *Jacobi* (l. c.) an dieses Problem an, welches dadurch zum Ausgangspunkte für umfassende Arbeiten algebraisch-geometrischer Natur wurde⁹⁵⁾, auf die hier nur hingewiesen werden kann.

Erst nach der Feststellung dieser Beziehungen zwischen den W eines Gl.-Systems ist es möglich, der Frage nach dem Interpolationsprobleme näher zu treten. Stellt man die F. f_α , ($\alpha = 1, 2, \dots, m$), deren Nullstellen wir wieder durch $(\xi_{1x}, \dots, \xi_{mx})$ bezeichnen, gemäss Nr. 4 in der Form

$$f_\alpha = \sum_{\varrho=1}^m (z_\varrho - \xi_{\varrho x}) \chi_{\alpha x \varrho}$$

dar, dann stehen die Determinanten aus den χ in enger Beziehung zu der Funkt.-Det. Sie treten bei der *Kronecker'schen* Behandlung des Interpolationsproblems (l. c.) an die Stelle der Nenner in der *Lagrange'schen* Formel. Die Interpolationsformel selbst ist von ähnlicher Konstitution wie die für eine einzige Variable. (Vgl. auch *H. Laurent*, *Algèbre*.)

25. Charakteristik eines Funktionensystems. Wir haben in Nr. 14 auf die Analogie zwischen der Ableitung $f'(z)$ einer Funktion $f(z)$ einer Var. und zwischen der Funkt.-Determ. J für m Funkt. von m Var. aufmerksam gemacht. Nun ist I B 1 a Nr. 4 darauf hingewiesen worden, dass das Verhalten der Ableitung $f'(z)$ in engster Beziehung zu der Art der Änderung der F. $f(z)$ selbst steht. Ähnliches war also bei einem Systeme von F. hinsichtlich der Funkt.-Det.

91) J. f. Math. 15 (1836), p. 285 = Werke 3, p. 329.

92) Berl. Mém. 1748, p. 219.

93) Introd. à l'analyse p. 78.

94) J. f. Math. 16 (1837), p. 47.

95) Vgl. D. M.-V. 3 (1892—93), p. 347 ff.

zu vermuten. Darauf hindeutende Bemerkungen finden sich bereits bei *J. J. Sylvester*⁹⁶); später hat *Kronecker* in seiner *Charakteristiken-theorie* gezeigt⁹⁷), dass diese Analogien in umfassender Weise platz greifen. Auch hier dient das Verschwinden von J dazu, die Gebiete von einander abzugrenzen, in denen die Realitätsverhältnisse der W. des Gl.-Systems verschieden sind. Wir verweisen auf I B 1 a, Nr. 22, I B 3 a, Nr. 7 und auf III 4.

26. Modul- oder Divisorensysteme. Eine Erweiterung des von *Gauss* in die Zahlentheorie eingeführten Begriffs eines *Modul* ist von *Kronecker* für das Gebiet beliebig vieler ganzer F . mit beliebig vielen Var. gegeben worden. Diese Erweiterung führt zu dem Begriffe des *Modulsystems* oder *Divisorensystems*, auf welchen *Kronecker* die arithmetische Behandlung der ganzen rationalen F . eines Rationalitätsbereiches gründet⁹⁸) [I B 1 c, Nr. 13, 14]. Das Modulsystem (f_1, f_2, \dots, f_m) ist der Inbegriff aller F . von der Gestalt $\sum \varphi_\lambda \cdot f_\lambda$ ($\lambda = 1, 2, \dots, m$), wobei die φ gze. ganzzahlige Funktionen bedeuten. Dieses Modulsystem umfasst gewissermassen alles, was seinen einzelnen Elementen an Eigenschaften gemeinsam ist. Daher ist es auch als Verallgemeinerung des Divisionsbegriffes aufzufassen, indem das bei einer Funktion auftretende Produkt $\varphi \cdot f$ hier durch $\sum \varphi_\lambda \cdot f_\lambda$ ersetzt wird. — Unabhängig von *Kronecker* und nicht so tief eindringend wie dieser, kam *H. Laurent* zu ähnlichen Entwicklungen⁹⁹).

27. Weitere Hinweise. Gewisse Untersuchungen über gz. F . mehrerer Var. werden an anderen Stellen besprochen. So ist z. B. hier nicht behandelt worden die Theorie der *Anzahl der Werte*, welche eine gz. F . bei allen möglichen Permutationen der Var. untereinander annimmt [I A 6]. Die hierzu gehörigen einwertigen oder symmetrischen F . (von einer oder von mehreren Var.-Reihen) haben wir mehrfach streifen müssen. Diese Theorie hängt eng mit der *Galois'schen* Gleichungstheorie zusammen; wir verweisen auf I B 3 b. — Eine beson-

96) Lond. Trans. 143 (1853), part. III, p. 407.

97) Berl. Ber. 1869, p. 159 u. 688; ibid. 1878, p. 145. Über die weitere analytische Ausbildung der Theorie vgl. *E. Picard*; J. de math. (4), 8 (1892), p. 5; Par. C. R. 113 (1891), p. 356, 669, 1012; *W. Dyck*, Par. C. R. 119 (1894), p. 1254; ibid. 120 (1895), p. 34; Münch. Ber. 1898, p. 203. Vgl. I B 3 a.

98) Grundzüge u. s. w. II. Abschn. — Die oben citierte *Moll'sche* Abhandlung kann als eine Art von Monographie für die Theorie der Divisorensysteme gelten. — Siehe ferner eine ganze Reihe von Arbeiten von *K. Hensel* im J. f. Math. und die Arbeit von *G. Landsberg*, Gött. Nachr. 1897, Heft 3 [I B 1 c, Nr. 21].

99) Nouv. Ann. (3) 2 (1883), p. 145; ibid. 5 (1886), pp. 432 u. 456.

dere Art der zweiwertigen F. von n Variablenreihen aus je n Grössen sind die Determinanten n^{ter} Ordnung; ihre Behandlung findet sich I A 2.

In diesen und in den vorigen Artikel gehört weiter auch dem Begriffe nach die gesamte Theorie der Formen, welche aber hauptsächlich wegen der verschiedenartigen Betrachtungsweise und mancher nicht algebraischen Hilfsmittel hier losgetrennt und in IB 2 untergebracht worden ist. Wir müssen jedoch hier wenigstens den sogenannten „Euler’schen Satz über homogene Funktionen“ hervorheben¹⁰⁰), da derselbe für viele der oben angedeuteten Beweise unentbehrlich ist. Ist $\varphi(z_1, \dots, z_m)$ eine homogene F. der n^{ten} Dimension, so hat man

$$\sum_{\lambda=1}^m z_{\lambda} \frac{\partial \varphi}{\partial z_{\lambda}} = m \varphi.$$

Mit der Formentheorie im Zusammenhange steht die der *linearen Substitutionen*, auf welche hier nur verwiesen werden kann.

Auf den polynomischen Satz ist schon I A 1 Nr. 13 in der Theorie der Kombinatorik hingewiesen worden.

An Einzelheiten seien noch zwei Arbeiten von F. Mertens¹⁰¹) über gewisse Arten von Funktionen mehrerer Variablen erwähnt.

Ferner gehört hierher ein Hinweis auf die Differenzenrechnung bei mehreren Variablen (vgl. I B 1a Nr. 4).

Ebenso treten Beziehungen zur Theorie der Funktionalgleichungen auf, sobald diese in unserem Gebiete ihre Lösung finden; so z. B. das Problem der „algebraischen Reversibilität“¹⁰²), bei dem es sich um die Bestimmung einer F. $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ handelt, für welche aus den für y_1, \dots, y_n angenommenen Gleichungen

$$\frac{f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{y_1} = \frac{f(x_2, x_3, \dots, x_n, x_1)}{y_2} = \dots = \frac{f(x_n, x_1, \dots, x_{n-1})}{y_n}$$

auch umgekehrt folgen soll

$$\frac{f(y_1, y_2, \dots, y_n)}{x_1} = \frac{f(y_2, y_3, \dots, y_n, y_1)}{x_2} = \dots = \frac{f(y_n, y_1, \dots, y_{n-1})}{x_n}.$$

100) Calc. diff. 1, § 225, p. 154. Ticini 1787. [Nach M. Cantor, Gesch. d. Math. 3, p. 733/34 schon in der 1. Aufl., Berol. 1755.]

101) Krakauer Abhandl. 2, I (1891), p. 333; Krakauer Denkschr. 17 (1891), p. 143.

102) D. André, Bull. soc. math. 24 (1896), p. 135.

Verzeichnis der Abkürzungen.

Diskr.	=	Diskriminante
F.	=	Funktion
Funkt.-Det.	=	Funktional-Determinante
Gl.	=	Gleichung
gz.	=	ganz
gr. gm. T.	=	grösster gemeinsamer Teiler
irred.	=	irreduktibel
red.	=	reduktibel
Res.	=	Resultante
Var.	=	Variable
W.	=	Wurzel.

IB1c. ALGEBRAISCHE GEBILDE.
IC 5. ARITHMETISCHE THEORIE ALGEBRAISCHER
GRÖSSEN.

VON

G. LANDSBERG

IN HEIDELBERG.

Inhaltsübersicht.

1. Aufgabe der arithmetischen Theorie der algebraischen Grössen.
 2. Körper oder Rationalitätsbereiche.
 3. Ganze Grössen eines Rationalitätsbereiches; Irreduktibilität.
 4. Konjugierte Körper; Diskriminanten.
 5. Beziehungen zur *Galois'schen* Theorie der Gleichungen.
 6. Fundamentalsysteme.
 7. Arten oder Species.
 8. Zerlegung der ganzen Grössen in Primdivisoren oder Primideale.
 9. Darstellung der Primdivisoren durch Association enthaltender Gattungen oder durch Association transcendenter Funktionen.
 10. Die Fundamentalgleichung.
 11. Ausführung der arithmetischen Theorie im Einzelnen.
 12. Zusammenhang mit der Theorie der Modulsysteme und algebraischen Gebilde.
 13. Elementare Eigenschaften der Modulsysteme.
 14. Der Stufenbegriff. Primmodulsysteme.
 15. Zerlegung in Primmodulsysteme. Diskriminante eines Modulsystemes.
 16. Anwendungen der Modulsysteme. Komplexe Zahlen mit mehreren Einheiten.
 17. *Dedekind's* Theorie der Moduln.
 18. Sätze von *Hilbert*.
 19. Verallgemeinerung des Teilbarkeits- und Äquivalenzbegriffes.
 20. Fundamentalsatz von *Noether*.
 21. Modulsysteme zweiter Stufe; ihre Normalformen.
 22. Darstellung algebraischer Gebilde durch rationale Parameter; Satz von *Lüroth*.
 23. Transformation algebraischer Gebilde.
-

Vorbemerkung.

Die Artikel IB1c und IC5 sind, um Wiederholungen zu vermeiden, unter IB1c vereinigt worden. Da die Untersuchung der algebraischen

Gebilde bis zu einem gewissen Grade die arithmetische Theorie der algebraischen Grössen voraussetzt, so ist die letztere (in den Nr. 1—11) vorangestellt und die erstere (in den Nr. 12—23) an sie angeschlossen worden. Die allgemeine Theorie der algebraischen Gebilde und Modulsysteme erscheint hiernach als der im rationalen Gebiete zu erledigende Teil der arithmetischen Theorie algebraischer Grössen.

Da dieser Zweig der Algebra in allen wesentlichen Teilen modernen Ursprungs ist, so kann nur im allgemeinen auf die Lehrbücher der *Algebra* von *H. Weber*, Braunschweig, Bd. I u. II, 1. Aufl. 1895/96, 2. Aufl. 1898/99 (bes. drittes Buch), *E. Netto* (bisher erschienen Bd. I u. II, Lief. 1, Leipzig 1896/98), *E. Borel* und *J. Drach*, Paris 1894, und auf die *Vorlesungen über Zahlentheorie* von *Lej. Dirichlet-R. Dedekind*, Braunschweig, 2. Aufl. 1871, 3. Aufl. 1879, 4. Aufl. 1894; bes. Supplement XI von *Dedekind*, hingewiesen werden.

1. Aufgabe der arithmetischen Theorie der algebraischen Grössen. Die Zahlentheorie im engsten Sinne des Wortes (IC 1) stellt dem umfassenderen Gebiete \Re der rationalen Zahlen das engere und ursprünglichere Gebiet \mathfrak{G} der ganzen Zahlen gegenüber und untersucht in erster Linie die Teilbarkeitseigenschaften der ganzen Zahlen. In zahlreichen algebraischen Untersuchungen findet sich der Gegensatz zwischen „rational“ und „ganz“ in verallgemeinerter Form wieder, und es sind die „ganzen“ Grössen vor den „rationalen“ durch „Teilbarkeitseigenschaften“ ausgezeichnet. Die Wissenschaft, welche die höchste Verallgemeinerung der Begriffe „rationale Grösse“, „ganze Grösse“, „Teilbarkeit“ aufsucht und die daraus entspringende Bearbeitung algebraischer Probleme nach zahlentheoretischen Methoden anstrebt, ist von *L. Kronecker* „arithmetische Theorie der algebraischen Grössen“ genannt worden¹⁾.

2. Körper oder Rationalitätsbereiche. Unter Grösse verstehen wir im folgenden ebensowohl irgend welche *Zahlen* als auch irgend welche *Funktionen* einer oder mehrerer unabhängiger Veränderlichen. Ein System von Grössen, welches in der Weise abgeschlossen ist, dass die Anwendung der vier rationalen Rechenoperationen, Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division (wobei man von der Division

1) Grundzüge einer arithmetischen Theorie der algebraischen Grössen; Festschrift zu Herrn Ernst Eduard Kummer's fünfzigjährigem Doctor-Jubiläum. Berlin 1882 (J. f. Math. 92, p. 1 = Werke 2, p. 237, weiterhin als „Festschrift“ citiert).

durch Null abzusehen hat) nie über das System hinausführt, heisst nach *R. Dedekind*²⁾ ein *Körper* (*Zahlkörper* oder *Funktionenkörper*), nach *Kronecker* ein *Rationalitätsbereich* (früher auch *Rationalitätsbezirk*). Wenn alle Grössen eines Körpers D auch einem Körper M angehören, so heisst D ein Divisor, Teiler³⁾, Unterkörper⁴⁾ von M , M ein Vielfaches, Multiplum⁵⁾, Oberkörper⁴⁾ von D .

Unter den Zahlkörpern ist der einfachste der Körper \mathfrak{R} der rationalen Zahlen, der in jedem anderen Körper enthalten ist; der umfassendste der Körper \mathfrak{Z} aller Zahlen, der jeden anderen Zahlkörper enthält. Das Hauptinteresse nehmen die *algebraischen* Zahlkörper⁵⁾ in Anspruch, welche durch eine oder mehrere algebraische Zahlen (Wurzeln ganzzahliger Gleichungen) und deren rationale Verbindungen gebildet werden (I C 4). Jeder algebraische Zahlkörper kann schon durch eine einzige Zahl konstituiert werden⁶⁾.

Unter den Funktionenkörpern ist der einfachste der Körper R der rationalen Funktionen von n Veränderlichen $x_1, x_2, \dots x_n$, wobei die Koeffizienten dieser Funktionen einem beliebigen Zahlkörper zugewiesen werden dürfen; der umfassendste Funktionenkörper ist der Körper aller Funktionen von n Veränderlichen. Von besonderem Interesse sind die *algebraischen* Funktionenkörper, welche durch eine oder mehrere algebraische Funktionen (Wurzeln von Gleichungen, deren Koeffizienten dem Körper R angehören) und deren rationale Verbindungen gebildet werden (II B 2). Jeder algebraische Funktionenkörper kann schon durch eine einzige algebraische Funktion konstituiert werden⁶⁾. Auch aus transcendenten Funktionen können Körper gebildet werden, z. B. der Körper aller elliptischen Funktionen mit gleichen Perioden oder der Körper aller elliptischen Modulfunktionen u. s. w.

Kronecker fasst die Körper \mathfrak{R} und R unter der Bezeichnung „*natürliche*“ Rationalitätsbereiche zusammen und stellt ihnen die algebraischen Zahl- und Funktionenkörper als „*Gattungsbereiche*“ gegenüber⁷⁾. Der Bereich, aus welchem der Gattungsbereich hervorgeht,

2) *Dirichlet-Dedekind*, Vorlesungen über Zahlentheorie, 2. 3. 4. Auflage, Braunschweig 1871, 1879, 1894, Supplement XI von *Dedekind* über die Theorie der algebraischen Zahlen, § 160. (Die Citate beziehen sich durchweg auf die 4. Auflage.)

3) *Dedekind* l. c. § 160, *Kronecker* (l. c. § 2) sagt dafür: M enthält D .

4) *D. Hilbert*, Bericht über die Theorie der algebraischen Zahlkörper 1897, im Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung 4, § 14.

5) Auch *endliche* Körper genannt, bei *Dedekind* l. c. § 164, VII.

6) Nach *Kronecker*; Beweis z. B. bei *Weber*, Algebra 1, § 143.

7) Festschrift §§ 2 und 3.

heisst *Stammbereich*. — Steigt man von einem Körper D zu einem Oberkörper M dadurch auf, dass man zu D eine oder mehrere ursprünglich nicht in D enthaltene Grössen hinzunimmt, so heisst dieser Prozess der Körpererweiterung *Adjunktion*⁸⁾.

Die frühesten Spuren des Körperbegriffs finden sich in *N. H. Abel's* Untersuchungen über algebraische Gleichungen⁹⁾, die Erkenntnis der Bedeutung der Adjunktion für die Theorie der Gleichungen gebührt *E. Galois*¹⁰⁾.

Der Körperbegriff ist nach *H. Weber* noch weitergehender Verallgemeinerung fähig, wenn man ihn dem allgemeinsten Gruppenbegriff (I A 6, Nr. 15; II A 6) unterordnet und definiert: ein Körper ist eine Gruppe mit einer zweifachen Art kommutativer Komposition. Hierdurch werden z. B. auch „*Kongruenzkörper*“ der gleichen Methode zugänglich, bei welchen alle Relationen zwischen Elementen des Körpers nur im Sinne einer Kongruenz modulo einer Primzahl statthaben¹¹⁾.

3. Ganze Grössen eines Rationalitätsbereiches; Irreduktibilität. In den natürlichen Rationalitätsbereichen \mathfrak{R} und R kann man das Gebiet der *ganzen* Grössen aussondern, wobei in \mathfrak{R} die ganzen Zahlen, in R die ganzen Funktionen als ganze Grössen den bloß rationalen Grössen gegenübergestellt werden. Die ganzen Grössen bilden den in \mathfrak{R} , resp. R enthaltenen *Integritätsbereich*; sie reproduzieren sich durch die Operationen der Addition, der Subtraktion und der Multiplikation.

Eine ganze Zahl heisst eine Primzahl, wenn sie nicht in zwei von der Einheit verschiedene ganzzahlige Faktoren zerlegbar ist; ebenso heisst eine ganze Funktion von n Variablen eine *Primfunktion* oder *irreduktibele* Funktion, wenn sie nicht in zwei von der Einheit verschiedene Faktoren, welche ganze Grössen des Bereiches sind, zerlegt werden kann¹²⁾. Diese Definition ist wesentlich davon

8) In dieser Allgemeinheit fasst den Begriff *Weber*, Algebra 1, § 140.

9) Oeuvres ed. *Sylow-Lie*, 1, p. 479 = J. f. Math. 2, p. 220 (1828); 4, p. 132 (1829).

10) Journ. de math. 11, p. 418 (1830, publiziert 1846).

11) *Weber*, Math. Ann. 43, p. 521 (1893). Algebra 2, § 64. Die Bedingungen, unter welchen endliche Gruppen mit einer zweifachen Art kommutativer Komposition auf Kongruenzkörper zurückgeführt werden können (d. h. ihnen holoeidrisch isomorph sind), untersucht *E. H. Moore* (Chicago Papers, p. 210 ff.) (1896 [1893]).

12) *Kronecker* fordert hier wie bei allen Definitionen (l. c. § 4 und anderswärts), dass eine Methode angegeben werde, durch welche im einzelnen Falle mit Hilfe einer endlichen Anzahl von Operationen entschieden werden könne, ob eine vorgelegte Grösse unter den Begriff zu subsumieren ist oder nicht, eine

abhängig, welchem Zahlkörper die Koeffizienten der ganzen Funktionen angehören. Ist dies der Körper \Re , so gilt der Satz: Jede ganze Grösse kann auf eine und nur eine Weise in Primfunktionen zerlegt werden¹³). Bei Zulassung anderer Zahlkörper für die Zahlkoeffizienten ist der Satz im allgemeinen nur dann richtig, wenn Funktionen, die sich nur um *Zahlfaktoren* unterscheiden, nicht als wesentlich verschieden betrachtet werden.

D. Hilbert hat bewiesen, dass man in einer irreduktibelen ganzen ganzzahligen Funktion von n Variablen stets und auf unendlich viele Arten die m letzten Variablen so gleich ganzen Zahlen setzen kann, dass eine *irreduktibele* Funktion der ersten $n - m$ Variablen entsteht; dieser Satz bleibt auch noch richtig, wenn der Bereich der Koeffizienten der ganzen Funktion ein beliebiger algebraischer Zahlkörper ist¹⁴).

Setzt man eine irreduktibele Funktion gleich Null, so entsteht eine irreduktibele Gleichung, durch welche, wenn nur eine Variable auftritt, eine algebraische Zahl, wenn mehrere Variablen auftreten, eine der Variablen (x) als algebraische Funktion der übrigen bestimmt wird; wenn in dieser Gleichung überdies der Koeffizient der höchsten Potenz von x gleich 1 ist, so ist x eine *ganze* algebraische Grösse (Zahl oder Funktion)¹⁵). Ganze algebraische Funktionen sind

Forderung, deren prinzipieller Berechtigung *Dedekind* entgegengetreten ist. (Was sind und was sollen die Zahlen? Braunschweig, 2. Aufl. 1893, Anm. auf p. 2.) Methoden zur Entscheidung [I B 1 a, Nr. 13, I B 1 b, Nr. 5] haben für ganzzahlige Funktionen einer Veränderlichen *K. Runge* (J. f. Math. 99, 1886, p. 89) und *M. Mandl* (J. f. Math. 113, 1894, p. 252), für Funktionen mehrerer Veränderlichen *W. Fr. Meyer* (Math. Ann. 30, 1887, p. 30) angegeben. Spezielle Irreduktibilitätskriterien bei *Th. Schönemann* (J. f. Math. 31, 1846, § 6), *G. Eisenstein* (ib. 39, 1850, p. 166), *L. Königsberger* (ib. 115, 1895, p. 53), *Netto* (Algebra 1, § 52—60; Math. Ann. 48, 1896, p. 82).

13) *Kronecker*, J. f. Math. 94, p. 344 = Werke 2, p. 408. *J. Molk*, Acta math. 6, p. 1 (1885), chap. 2, § 1.

14) J. f. Math. 110, p. 104 (1892). Gewissermassen ein Gegenstück zu diesem Satze bildet der ebenfalls von *Hilbert* geführte Nachweis, dass es ganze ganzzahlige irreduktibele Funktionen einer Veränderlichen giebt, welche modulo jeder Primzahl und modulo jeder Primzahlpotenz zerlegt werden können. *Gött. Nachr.*, Febr. 1897.

15) *Kronecker*, J. f. Math. 91, p. 301 (1862, veröffentlicht 1881), *Dedekind* seit 1871, s. Zahlentheorie § 173. Infolge der Sätze über die eindeutige Zerlegbarkeit ist eine algebraische Grösse auch dann ganz, wenn *irgend eine* der Gleichungen, denen sie genügt, zum höchsten Koeffizienten die 1 und im übrigen ganze rationale oder ganze algebraische Grössen zu Koeffizienten hat. Diese Definition der ganzen algebraischen Grösse bezeichnet den eigentlichen Fortschritt der modernen Theorien und steht im Gegensatz zu der formalen Defini-

auch dadurch zu charakterisieren, dass sie nirgends im Endlichen unendlich werden. Ist eine ganze algebraische Grösse zugleich rational, so ist sie eine ganze rationale Grösse im früher bestimmten Sinne des Wortes.

Eine irreduktibele Gleichung hat mit einer anderen Gleichung endlichen Grades entweder alle Wurzeln oder keine gemein; mit einer Gleichung unendlich hohen Grades aber (einer gleich Null gesetzten Potenzreihe) kann eine irreduktibele Gleichung sehr wohl eine einzige Wurzel gemein haben¹⁶⁾. Die Definition der Irreduktibilität lässt sich auch auf *Systeme* übertragen: ein System von Gleichungen mit mehreren Variabeln, dessen Koeffizienten einem bestimmten Rationalitätsbereiche angehören und dessen sämtliche Lösungen eine k -fache Mannigfaltigkeit bilden, heisst irreduktibel, wenn jedes andere Gleichungssystem, das mit ihm eine k -fache Mannigfaltigkeit von Lösungen gemein hat und dessen Koeffizienten dem gleichen Rationalitätsbereiche angehören, durch *alle* seine Lösungen befriedigt wird und wenn überdies alle mehrfachen Lösungen des Systemes eine weniger als k -fache Mannigfaltigkeit bilden¹⁷⁾.

4. Konjugierte Körper; Diskriminanten. Ist $F(x) = 0$ eine Gleichung n^{ten} Grades, deren Koeffizienten einem Körper Ω angehören und welche in eben diesem Körper irreduktibel ist, und ξ eine Wurzel dieser Gleichung, so bildet die Gesamtheit aller rationalen Funktionen von ξ , welche mit Koeffizienten aus Ω gebildet sind, einen dem Bereiche Ω entstammenden Gattungsbereich (*Kronecker*), einen Körper über Ω (*Weber*). Jedes Element dieses Körpers K kann in eindeutig bestimmter Weise als ganze Funktion $(n - 1)^{\text{ten}}$ Grades von ξ mit in Ω rationalen Koeffizienten dargestellt werden. Sind $\xi', \xi'', \dots \xi^{(n-1)}$ die übrigen Wurzeln jener Gleichungen und ersetzt man überall die Wurzel ξ bezüglich durch $\xi', \xi'', \dots \xi^{(n-1)}$, so gelangt man zu den *konjugierten Körpern* $K', K'', \dots K^{(n-1)}$, von jeder Grösse $\varphi(\xi)$ zu den $(n - 1)$ *konjugierten Grössen* $\varphi(\xi'), \dots \varphi(\xi^{(n-1)})$. Der Übergang von einem Körper zu einem der konjugierten kann nach *Dedekind*

tion der älteren (*Kummer* etc.), bei welchen durchweg mit ganzen ganzzahligen Funktionen einer willkürlich gewählten Ausgangsgrösse operiert, die Untersuchung also von vornherein auf eine gewisse Spezies von Zahlen oder Funktionen (s. Nr. 7) beschränkt wird.

16) *Königsberger*, J. f. Math. 95, p. 193 (1883); *A. Hurwitz*, Acta math. 14, p. 211 (1890); *Dedekind* im Jahresbericht d. deutschen Math.-Ver. 1, p. 23 (1892).

17) In dieser Weise ist eine von *G. Frobenius* mitgeteilte Definition (J. f. Math. 84, 1878, p. 46) zu vervollständigen. Eine einfachere Definition erfolgt später (Nr. 14).

als ein Abbildungsprozess aufgefasst werden, bei welchem alle rationalen Beziehungen erhalten bleiben¹⁸⁾; als rational ist hier (und im folgenden) jede Grösse des Stammbereichs Ω anzusehen.

Symmetrische Funktionen der Konjugierten sind Grössen des Stammbereiches Ω ; insbesondere heisst die Summe der Konjugierten einer Grösse η des Körpers K die *Spur* ($S(\eta)$), das Produkt der Konjugierten die *Norm* ($N(\eta)$) von η .¹⁹⁾ Sind $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ n Grössen des Körpers K , so ist auch das Determinantenquadrat

$$\Delta(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n) = |\eta_v^{(g)}|^2 \quad \left(\begin{matrix} v = 1, 2, \dots, n \\ g = 0, 1, \dots, n-1 \end{matrix} \right)$$

eine Grösse in Ω , welche die *Diskriminante* des Systemes $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ genannt wird; je nachdem die Diskriminante verschwindet oder nicht verschwindet, je nachdem ist eine homogene lineare Relation mit Koeffizienten des Körpers Ω zwischen $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ vorhanden oder ausgeschlossen. Sind $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ die n ersten Potenzen der Grösse η , so heisst die Diskriminante $\Delta(1, \eta, \eta^2, \dots, \eta^{n-1})$ die *Diskriminante von η* ; dieselbe ist bis aufs Vorzeichen gleich der Norm der dem Körper K angehörigen Grösse

$$(\eta - \eta')(\eta - \eta'') \dots (\eta - \eta^{(n-1)}),$$

welche nach *Hilbert* die *Differente* von η heisst²⁰⁾.

Jede Grösse $\eta = \varphi(\xi)$ des Körpers K genügt einer bestimmten Gleichung n^{ten} Grades

$$N(x - \varphi(\xi)) = (x - \varphi(\xi))(x - \varphi(\xi')) \dots (x - \varphi(\xi^{(n-1)})) = 0;$$

die linke Seite der Gleichung ist entweder irreduktibel, wenn nämlich die Diskriminante von η von Null verschieden ist, oder aber die e^{te} Potenz einer ganzen Funktion f^{ten} Grades von x ($n = ef$), wenn die Diskriminante von η gleich Null ist²¹⁾. Wenn die Gleichungen aller Grössen η , die zu K , aber nicht zu Ω gehören, irreduktibel sind, so heisst der Körper K *primitiv*, anderenfalls *imprimitiv*²²⁾. Im letzteren Falle bilden die rationalen Funktionen von η einen Körper \overline{K} über Ω vom f^{ten} Grade und es ist K ein Körper über \overline{K} vom e^{ten} Grade.

18) Zahlentheorie § 161.

19) „Spur“ zuerst bei *Dedekind-Weber* (J. f. Math. 92, 1882, p. 188) u. *Dedekind*, Gött. Abhandlgn. 1882. Der Ausdruck „Norm“ geht auf *K. F. Gauss* (1831), (Werke 2, p. 103) und *E. E. Kummer* (1844) (J. de math. 12, p. 187) zurück.

20) Bericht üb. d. Th. d. alg. Z. § 3.

21) *Th. Schönemann*, J. f. Math. 31, p. 273 (1845) scheint zuerst diesen später oftmals bewiesenen Satz im Gebiete der algebraischen Zahlkörper aufgestellt zu haben.

22) *Weber*, Algebra § 144. Die Bezeichnung ist von der entsprechenden Eigenschaft der Gruppe hergenommen.

Nimmt man insbesondere als Stammbereich Ω den Körper aller symmetrischen rationalen Funktionen der ν Variablen x_1, x_2, \dots, x_ν , welcher identisch ist mit dem Körper aller rationalen Funktionen der elementaren symmetrischen Verbindungen f_1, f_2, \dots, f_ν dieser ν Variablen (I B 3 b, Nr. 1), und als Oberkörper K den Körper aller rationalen Funktionen von x_1, x_2, \dots, x_ν , so genügt jede Grösse φ von K einer Gleichung des Grades $n = \nu!$ mit Koeffizienten des Körpers Ω :

$$(x - \varphi)(x - \varphi') \cdots (x - \varphi^{(n-1)}) = \Theta(x, f_1, f_2, \dots, f_\nu) = 0,$$

worin $\varphi, \varphi', \varphi'', \dots, \varphi^{(n-1)}$ die aus φ durch die $\nu!$ Permutationen der Variablen x hervorgehenden Funktionen bedeuten. Wenn aber φ bei einer Gruppe von e Permutationen ungeändert bleibt und somit bei allen Permutationen der Variablen nur $f = \frac{\nu!}{e}$ Werthe annimmt, so wird $\Theta(x)$ die e^{te} Potenz einer im Körper Ω irreduktibelen Funktion f^{ten} Grades $\Theta_1(x, f_1, \dots, f_\nu)$, ein Satz, welcher bereits von *J. L. Lagrange* aufgestellt worden ist²³⁾ (I B 3 c, d, Nr. 1).

5. Beziehungen zur Galois'schen Theorie der Gleichungen.

Die Körpertheorie ist nach heutiger Auffassung die eigentliche Grundlage der *Galois'schen* Theorie der algebraischen Gleichungen (I B 3 c, d). Zu einer vorgelegten Gleichung n^{ten} Grades $F(x) = 0$, die auch in Ω reduktibel sein, aber keine gleichen Wurzeln enthalten darf, gehören n konjugierte Körper $K, K', \dots, K^{(n-1)}$, und es ist stets möglich, denjenigen Körper L von möglichst niedrigem Grade zu bestimmen, welcher alle n Körper $K, K', \dots, K^{(n-1)}$ enthält. Es geschieht dies durch Aufstellung der irreduktibelen Gleichung ϱ^{ten} Grades, welcher die mit den Unbestimmten $u, u', \dots, u^{(n-1)}$ gebildete Grösse

$$\Theta = u\xi + u'\xi' + \dots + u^{(n-1)}\xi^{(n-1)}$$

genügt; diese Gleichung heisst die *Galois'sche Resolvente*. Den Unbestimmten $u, u', \dots, u^{(n-1)}$ dürfen auch solche individuelle Werte des Körpers Ω beigelegt werden, dass die Wurzeln der Gleichung ϱ^{ten} Grades für Θ von einander verschieden ausfallen. Der Körper L ist alsdann ein *Normalkörper* oder *Galois'scher Körper*, d. h. er ist mit allen seinen konjugierten Körpern identisch; jede rationale Funktion von $\xi, \xi', \dots, \xi^{(n-1)}$ ist eine Grösse in L und umgekehrt. Der Körper L gestattet ϱ Abbildungen in sich selbst, bei welchen die Wurzel Θ der Galois'schen Resolvente in irgend eine

23) Berlin Mém. 1770 p. 134, 1771 p. 138 (= Oeuvres t. 3, p. 204, § 86 ff). *Ev. Galois*, J. de math. t. XI, p. 420 (1846); *C. Jordan*, Traité des substitutions, Paris 1870, Art. 352; *Netto*, Substitutionentheorie, Leipzig 1882, § 51 und etwas allgemeiner § 100.

zweite Wurzel dieser Gleichung übergeführt wird. Die Wurzeln $\xi, \xi', \dots \xi^{(n-1)}$ der Gleichung $F(x) = 0$ erleiden bei diesen ϱ Abbildungen ϱ Vertauschungen, die in ihrer Gesamtheit eine Gruppe \mathfrak{G} bilden. Diese Gruppe \mathfrak{G} heisst die *Gruppe der Gleichung*; jede rationale Funktion der Grössen $\xi, \xi', \dots \xi^{(n-1)}$, welche bei Anwendung der ϱ Substitutionen der Gruppe ihren Wert ungeändert erhält, ist eine Grösse in Ω , und jede rationale Funktion von $\xi, \xi', \dots \xi^{(n-1)}$, welche eine Grösse in Ω ist, gestattet die Substitutionen der Gruppe. Die algebraische Theorie der Gleichungen gründet sich auf die Kenntnis der Eigenschaften des Normalkörpers L .²⁴⁾ Die Gruppe der allgemeinen Gleichungen n^{ten} Grades mit unbestimmten Koeffizienten ist die symmetrische Gruppe aller $n!$ Substitutionen; besondere Gleichungen sind dadurch charakterisiert, dass eine unter der Gattung der symmetrischen Funktionen enthaltene Gattung von Funktionen der Wurzeln zum Rationalitätsbereiche (zum Körper Ω) gehört, nämlich diejenige Gattung, welche bei den ϱ Substitutionen der Gruppe der Gleichung ungeändert bleibt. Diesen besonderen Gleichungen spricht man nach *Kronecker* einen *Affekt*²⁵⁾ zu und nennt eine bei den ϱ Substitutionen invariante Funktion φ der Wurzeln, welche den Affekt charakterisirt, eine *Affektfunktion*. Die Affektfunktion φ geht aus dem Körper der symmetrischen Funktionen durch eine Gleichung des Grades $\frac{n!}{\varrho}$ hervor, welche bei einer allgemeinen Gleichung n^{ten} Grades irreduktibel ist (Nr. 4), für die spezielle Gleichung $F(x) = 0$ aber eine rationale Wurzel hat; die Zahl $\frac{n!}{\varrho}$ heisst die *Ordnung des Affektes*. Diese Thatsache kann man nach *Kronecker* auch unter folgendem Gesichtspunkte erfassen: ist $F(x) = x^n - c_1 x^{n-1} + \dots \pm c_n = 0$ die vorgelegte Gleichung und bedeuten $f_1, f_2, \dots f_n$ die elementaren symmetrischen Funktionen der Wurzeln, so kann das Gleichungssystem $f_1 = c_1, f_2 = c_2, \dots f_n = c_n$ reduktibel sein, selbst wenn $F(x)$ irreduktibel ist (s. Nr. 3); durch Hinzufügung einer Gleichung $\varphi = c$, die den (rationalen) Wert c der Affektfunktion φ angiebt, wird das System irreduktibel, und eine Affektfunktion ist eine solche, durch deren Hinzufügung das Gleichungssystem irreduktibel wird²⁶⁾.

24) *Dedekind*, Zahlentheorie § 166; *Weber*, Algebra 1, Abschn. 13.

25) *Kronecker* gebraucht den Terminus „*Affekt*“ zum ersten Male Berl. Monatsber. 1858, p. 288. [I B 3 b, Nr. 15, 20].

26) Festschrift § 11 u. 12; J. f. Math. 100, p. 490 (1886). Die Definition „Ordnung des Affektes“ ist im Anschluss an *Weber*, Algebra 1, § 149 gegeben, während *Kronecker* in § 12 der Festschrift die Zahl ϱ als O. d. A. bezeichnet.

Aus dem in Nr. 3 angegebenen Satze von *Hilbert* folgt, dass man unbegrenzt viele Gleichungen mit ganzzahligen Koeffizienten konstruieren kann, deren Gruppe im Bereiche der rationalen Zahlen die symmetrische oder die alternierende Gruppe ist²⁷⁾. Dieser Satz bleibt bestehen, wenn der Stammbereich Ω nicht der Körper \Re , sondern ein beliebig vorgegebener Zahlkörper sein soll.

6. Fundamentalsysteme. In einem dem Bereiche Ω entstammenden Gattungsbereiche K von der n^{ten} Ordnung (einem Körper über Ω) lassen sich die *ganzen* algebraischen Grössen von den gebrochenen aussondern. In jedem solchen Gattungsbereiche kann man m ganze Grössen $y_1, y_2, \dots y_m$ so bestimmen, dass man *alle* ganzen Grössen des Bereiches erhält, wenn man in der Linearform

$$y = u_1 y_1 + u_2 y_2 + \dots + u_m y_m$$

für $u_1, u_2, \dots u_m$ alle möglichen ganzen Grössen des Stammbereiches Ω nimmt²⁸⁾; ein solches System von m Grössen heisst ein *Fundamentalsystem* (*Kronecker*) oder eine *Basis* (*Dedekind*); die Linearform y heisst die *Fundamentalfom*. Die Zahl m ist, allgemein zu reden, grösser als n , indess kann man drei Fälle angeben, in welchen $m=n$ ist und in welchen also die Koeffizienten $u_1, u_2, \dots u_m$ für ein gegebenes Fundamentalsystem durch Angabe der ganzen Grösse y *eindeutig* bestimmt sind. Es tritt dies ein:

1) wenn der Körper K ein algebraischer Zahlkörper und Ω der Körper der rationalen Zahlen ist²⁹⁾. (Hingegen trifft es im allgemeinen nicht mehr zu, wenn K ein Zahlkörper und Ω ein beliebiger in K enthaltener algebraischer Zahlkörper, d. h. wenn K nach *Hilbert'scher* Bezeichnung ein *Relativkörper*³⁰⁾ ist.)

2) wenn der Körper K ein algebraischer Funktionenkörper und Ω der Körper der rationalen Funktionen *einer* Veränderlichen ist³¹⁾ (bei algebraischen Funktionen mehrerer Veränderlichen ist im allgemeinen $m > n$).

3) wenn der Körper Ω der Körper aller symmetrischen Funktionen von ν Variablen $x_1, x_2, \dots x_\nu$ mit rationalen Zahlkoeffizienten und der Körper K aller derjenigen rationalen Funktionen von $x_1, \dots x_\nu$

27) J. f. Math. 110, p. 123 ff. (1892). Einen Teil des Satzes beweist auf ganz elementarem Wege *H. Weber* (Chicago Congr. Papers [1896 (1893)], p. 401).

28) Festschrift § 6.

29) *Dirichlet-Dedekind*, Zahlentheorie § 175.

30) Bericht über d. Theorie der alg. Zahlkörper § 14.

31) *Kronecker*, J. f. Math. 91, p. 308 ff.; *Dedekind-Weber*, J. f. Math. 92, p. 193 f.

mit rationalen Zahlkoeffizienten ist, welche eine bestimmte Gruppe von $\frac{v!}{n}$ Substitutionen gestatten (s. Nr. 4 Ende); hierbei werden also für eine ganze Grösse des Bereiches die Koeffizienten u_1, u_2, \dots, u_n ganze Funktionen der elementaren symmetrischen Funktionen f_1, f_2, \dots, f_v mit rationalen Zahlkoeffizienten³²⁾.

Wenn $m = n$ ist, so ist die Diskriminante des Fundamentalsystemes

$$D = |y_g^{(h)}|^2 \quad (g, h = 1, 2, \dots, n)$$

eine ganze Grösse in Ω , welche bei Transformation des Fundamentalsystemes ungeändert bleibt und der grösste gemeinschaftliche Teiler aller Diskriminanten von irgend n ganzen Grössen des Körpers ist; D heisst die *Diskriminante der Gattung* oder *des Körpers*.

Die Diskriminante eines Körpers ist ein Vielfaches der Diskriminante jedes Unterkörpers³³⁾.

Wenn $m > n$ ist, so hat man in der Matrix

$$||y_1^{(h)}, y_2^{(h)}, \dots, y_m^{(h)}|| \quad (h = 1, 2, \dots, n)$$

noch $m - n$ Zeilen unbestimmter Elemente hinzuzufügen, das Quadrat der so entstehenden Determinante heisst alsdann die *Diskriminantenform* der *Gattung*. Unter der *Diskriminante der Gattung* hat man alsdann den grössten gemeinsamen Teiler der Koeffizienten der Diskriminantenform zu verstehen; dieser grösste Teiler braucht aber alsdann keine Grösse des Körpers Ω zu sein, sondern er ist im allgemeinen nur durch das aus allen Koeffizienten gebildete Divisorensystem (s. Nr. 8) darzustellen.

Betrachtet man die Diskriminanten der Gattungen rationaler Funktionen von v Variablen, welche bei einer Gruppe von $\frac{v!}{n}$ Substitutionen ungeändert bleiben, so ergibt sich zunächst die Diskriminante der *Galois'schen Gattung*, welche aus allen rationalen Funktionen von x_1, x_2, \dots, x_v besteht, gleich $\vartheta^{\frac{1}{2}v!}$, worin

$$\vartheta = \prod (x_g - x_h) \quad \left(\begin{matrix} g, h = 1, 2, \dots, v \\ g \neq h \end{matrix} \right)$$

ist. Da jede andere Funktionsgattung \mathfrak{G} unter der *Galois'schen Gattung* enthalten ist, so ist ihre Diskriminante ebenfalls eine Potenz von ϑ . Der Potenzexponent einer Gattung n -wertiger Funktionen ist

32) Festschrift § 12.

33) *ibid.* § 9.

von *E. Netto* gleich $\frac{1}{2}n - \frac{nq}{v(v-1)}$ bestimmt worden, worin q die Anzahl der Transpositionen der Gruppe von \mathfrak{G} bedeutet³⁴).

7. Arten oder Species. Aus den ganzen Grössen des Körpers K lassen sich engere Gebiete aussondern, welche ebenfalls die Eigenschaft haben, dass man bei Anwendung der Operationen der Addition, Subtraktion und Multiplikation das Gebiet nicht überschreitet. Man erhält solche, wenn man dem Körper K irgend k ganze Grössen $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_k$ entnimmt und alle ganzen Funktionen von $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_k$ bildet, deren Koeffizienten ganze Grössen des Stammbereiches Ω sind. Ein solches Grössengebiet heisst nach *Kronecker* eine *Species* oder *Art*, nach *Dedekind* eine *Ordnung*, nach *Hilbert* ein *Ring* algebraischer Grössen³⁵). Für diese Arten gelten ähnliche Gesetze wie für die „Hauptart“, welche aus allen ganzen Grössen des Körpers K besteht, es giebt Fundamentalsysteme etc.

8. Zerlegung der ganzen Grössen in Primdivisoren oder Primideale. Die ganzen algebraischen Grössen des Gattungsbereiches K gestatten eine Zerlegung in Primfaktoren in ähnlicher Weise, wie die ganzen Grössen eines natürlichen Rationalitätsbereiches; indess ist es, um diese Analogie zu einer vollkommenen zu machen, erforderlich, dem Körper K neue Elemente zu associieren. Es sei der Stammbereich Ω ein natürlicher und es sei ferner der Körper K in Bezug auf Ω vom n^{ten} Grade, so heisst eine mit irgend welchen neuen Unbestimmten u_1, u_2, \dots gebildete ganze rationale Funktion, deren Koeffizienten ganze Grössen des Körpers K sind, nach *Kronecker* eine *Form des Körpers K*. Dabei ist abweichend von der gewöhnlichen Terminologie auch eine nicht homogene Funktion als Form bezeichnet, damit die ganzen Grössen des Körpers K ebenfalls mit darunter begriffen sind. Eine Form ist als analytisches Äquivalent für die Darstellung des grössten gemeinschaftlichen Teiler ihrer Koeffizienten anzusehen; die Berechtigung dieser Auffassung ergibt sich aus den folgenden Sätzen. Eine Form, deren Koeffizienten dem Stammbereiche Ω angehören, heisst eine *rationale Form*. Multipliziert man eine Form F des Körpers K mit den konjugierten Formen $F', F'', \dots, F^{(n-1)}$, so ist das Produkt $F, F', \dots, F^{(n-1)}$ (die *Norm* von F) eine rationale Form, und ihre Koeffizienten besitzen also einen bestimmten, dem Stammbereiche Ω angehörigen grössten gemeinsamen Teiler³⁶). Wenn

34) J. f. Math. 90, p. 164 (1881), Acta math. 1, p. 371 ff. (1882).

35) Festschrift p. 15; *Dedekind's* Zahlentheorie § 170; *Hilbert's* Bericht § 31.

36) *Hilbert* bezeichnet (Bericht § 6) diesen Teiler als Norm von F .

dieser Teiler gleich 1 ist, so heisst die Form F eine *primitive* oder *Einheitsform*. Wenn zwei Formen des Körpers K sich zu einander wie zwei Einheitsformen verhalten, so heissen sie *absolut äquivalent*; zwei solche Formen sind im Sinne einer Zerlegung als nicht wesentlich von einander verschieden zu betrachten. Formen, deren Koeffizientensysteme übereinstimmen und welche sich nur durch die Potenzprodukte der Unbestimmten unterscheiden, mit welchen die gleichen Koeffizienten multipliziert sind, sind äquivalent. Eine Form heisst *irreduktibel* oder eine *Primform* (*Primdivisor*), wenn sie nicht einem Produkte zweier Formen, von denen keine eine Einheitsform sein darf, äquivalent ist. Dann gilt der Satz: *Jede Form F des Körpers K lässt sich auf eine und im wesentlichen nur auf eine Weise als Produkt von Primdivisoren darstellen, wenn äquivalente Divisoren als nicht verschieden betrachtet werden*^{37).}

An Stelle der Formen betrachtet *Dedekind* unendliche Systeme von ganzen Grössen des Körpers K . Sind $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ ganze Grössen des Körpers K , so heisst der Inbegriff aller Grössen, welche durch die Linearform $\xi\alpha + \eta\beta + \zeta\gamma + \dots$ dargestellt werden können, wenn ξ, η, ζ, \dots ganze Grössen des Körpers K sein sollen, ein *Ideal* des Körpers K . Falls dieses Ideal durch eine einzige Grösse α festgelegt werden kann, heisst es ein *Hauptideal* (α). Unter dem Produkte zweier Ideale

$$a = (\alpha_1, \alpha_2, \dots \alpha_r), \quad b = (\beta_1, \beta_2, \dots \beta_s)$$

ist das Ideal

$$c = ab = (\alpha_1\beta_1, \dots \alpha_1\beta_s, \alpha_2\beta_1, \dots \alpha_2\beta_s, \dots \alpha_r\beta_s)$$

zu verstehen. Ein Ideal, welches nicht als Produkt zweier Ideale dargestellt werden kann, von denen keines das Hauptideal (1) sein darf, heisst ein *Primideal*. Dann lautet der Zerlegungssatz: *Jedes Ideal ist auf eine und nur eine Weise in Primideale zerlegbar*^{38).} Der Vergleich mit der Kronecker'schen Formentheorie wird durch folgende Erwägungen gegeben: Jeder Form des Körpers K entspricht dasjenige

37) Festschrift §§ 14—18. Die *Kronecker'sche* Formentheorie ist mit einigen Modifikationen in *Weber's Algebra* (Bd. 2, Abschn. 16) aufgenommen. *Weber* betrachtet auch *gebrochene* rationale Funktionen der Unbestimmten mit Koeffizienten des Körpers K und nennt dieselben *Funktionale*. Wenn ein Funktional durch Multiplikation mit einer Einheitsform in eine (*Kronecker'sche*) Form des Körpers K verwandelt werden kann, heisst es ein *ganzes* Funktional. Dann lautet der Zerlegungssatz: ein ganzes Funktional kann auf eine und nur eine Weise in Primfunktionale zerlegt werden, wenn associierte (äquivalente) Funktionale als nicht verschieden betrachtet werden.

38) Zahlentheorie §§ 177—179, *Dedekind-Weber*, J. f. Math. 92, §§ 7—9.

Ideal, welches durch die Koeffizienten der Form bestimmt wird. Äquivalenten Formen entspricht dasselbe Ideal, und Formen, welche einer Grösse des Körpers K äquivalent sind, entspricht ein Hauptideal. Dem Produkte zweier Formen entspricht das Produkt der zugehörigen Ideale, den Primdivisoren entspricht ein Primideal. Hieraus geht die Identität beider Zerlegungssätze hervor. Das Ideal α erscheint hierbei als grösster gemeinschaftlicher Teiler der Grössen $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r$, die es bestimmen; der grösste gemeinschaftliche Teiler der Ideale α und β ist das Ideal $(\alpha_1, \dots, \alpha_r, \beta_1, \dots, \beta_s)$, welches durch Zusammenstellung beider Ideale entsteht.

9. Darstellung der Primdivisoren durch Association enthalten- der Gattungen oder durch Association transcenderter Funktionen.

Wenn das Ideal α kein Hauptideal ist, so ist der grösste gemeinschaftliche Teiler der Zahlen $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ keine Grösse des Körpers K , sondern eben nur durch eine dem Körper K associierte Form darstellbar. Man kann aber in gewissen Fällen durch eine andere Art der Association die Ideale auch als *Grössen* darstellen, die aber alsdann nicht dem Körper K , sondern einem erweiterten Bereiche angehören. Diese Art der Darstellung idealer Elemente ist bisher vorzugsweise in folgenden beiden Fällen durchgeführt worden.

Ist K ein imaginärer quadratischer Zahlkörper, so liefern die Transformationsgleichungen [II B 4 a, 6] der Theorie der elliptischen Funktionen einen Zahlkörper \mathfrak{K} , der K enthält und dessen Ordnung in Bezug auf K gleich der Klassenzahl des Körpers K ist. In dem Körper \mathfrak{K} werden alle Ideale des Körpers K zu Hauptidealen; jedes Ideal von K kann also durch eine *Zahl* von \mathfrak{K} dargestellt werden. Der Körper \mathfrak{K} heisst der *Klassenkörper* von K .³⁹⁾ Die allgemeine Theorie der Klassenkörper ist neuerdings von *H. Weber* und *D. Hilbert* in Angriff genommen worden⁴⁰⁾.

Ist K ein Körper algebraischer Funktionen [II B 2] einer Veränderlichen, welche über einer Riemann'schen Fläche \mathfrak{R} ausgebreitet sind, so liefert die Theorie der Abel'schen Integrale das Mittel, um die sämtlichen Ideale von K zu Hauptidealen zu machen. Ist das Geschlecht von \mathfrak{R} gleich p , so giebt es auf \mathfrak{R} p linear unabhängige Integrale erster Gattung u_1, u_2, \dots, u_p ; ist ferner α ein willkürlicher aber fester Punkt auf \mathfrak{R} , so giebt es p linear unabhängige Normalintegrale zweiter

39) *Kronecker*, Berl. Monatsberichte 1857, p. 455; *Weber*, Elliptische Funktionen und algebraische Zahlen, Braunschweig 1891, Teil III, bes. § 110; *Weber*, Math. Ann. 48 (1897), p. 433; 49 (1897), p. 83; 50 (1898), p. 1.

40) *Weber*, *ibid.*; *Hilbert*, Jahresber. d. Dtsch. Math.-Ver. 6, p. 88 u. Math. Ann. 51 (1898), p. 1.

Gattung $v_1, v_2, \dots v_p$, welche nur in a unendlich werden und nicht auf algebraische Funktionen reduziert werden können. Ist nun Π ein Elementarintegral dritter Gattung, welches in a und einem zweiten Punkte p mit den Residuen -1 und $+1$ logarithmisch unendlich wird, so kann man zu Π eine lineare homogene Funktion von $u_1, \dots u_p, v_1, \dots v_p$ so hinzufügen, dass das entstehende Integral $\overline{\Pi}$ nur noch die von den logarithmischen Unstetigkeiten herrührende Periode $2\pi i$, aber keine cyklische Periode hat, und es ist also $e^{\overline{\Pi}} = P$ eine *einwertige* Funktion auf \Re , welche in p in erster Ordnung verschwindet und in a eine wesentlich singuläre Stelle hat. Eine solche Funktion heisst nach *Weierstrass* eine *Primfunktion*; dieselbe entspricht genau einem Primideale des Körpers K , d. i. der Gesamtheit der Funktionen des Körpers, welche in p Null und in vorgeschriebener Weise unendlich werden. Jede Funktion φ des Körpers K von der Ordnung r kann auf eine und nur eine Weise in die Form gesetzt werden:

$$\varphi = c \cdot \frac{P_1 P_2 \dots P_r}{P'_1 P'_2 \dots P'_r},$$

wo c eine Konstante und $P_1, P_2, \dots P_r$ die zu den Nullpunkten, $P'_1, P'_2, \dots P'_r$ die zu den Unendlichkeitspunkten der Funktion φ gehörigen Primfunktionen bedeutet. Umgekehrt stellt jeder derartige Quotient eine Funktion des Körpers dar, falls die Null- und die Unendlichkeitsstellen so gewählt werden, dass der Punkt a nicht mehr wesentliche Singularität der Funktion ist; die hierzu erforderlichen Bedingungen werden durch die Gleichungen des Abel'schen Theoremes gegeben⁴¹⁾.

An Stelle der *Weierstrass'schen Primfunktion* führt *F. Klein* *Primformen* ein, indem die unabhängige Variable $x = \frac{x_1}{x_2}$ in einen Zähler und einen Nenner gespalten wird und homogene transcendente Funktionen von x_1, x_2 gebildet werden. Ist $P_{\xi\eta}^x = P_{\xi\eta}^{xy}$ ein Integral dritter Gattung mit den Parametern ξ, η und den Argumenten x, y , welches Vertauschung von Parameter und Argument gestattet, setzt man ferner die Riemann'sche Fläche als eine „kanonische“ voraus, auf welcher eine nur in den Verzweigungspunkten verschwindende ganze algebraische Form $G(x_1, x_2)$ existiert, und wird $\frac{x_1 dx_2 - x_2 dx_1}{G(x_1, x_2)} = d\xi_x$ gesetzt, so ist die *Klein'sche Primform*

41) *K. Weierstrass*, Werke 2, p. 235; vgl. auch *F. Schottky*, J. f. Math. 101 (1887), p. 227; *A. Brill* u. *M. Noether*, Die Entwicklung d. Theorie der algebraischen Funktionen, deutsche Math.-Ver. 3 (1894), p. 428. Eine Veröffentlichung der bisher nur in Vorlesungen bekannt gegebenen Theorie von *Weierstrass* ist in nahe Aussicht gestellt worden; bei der gegebenen Darstellung benutzte ich eine mündliche Mitteilung von *A. Hurwitz*.

$$P(x, y) = \lim \sqrt{-d\xi_x d\xi_y e^{-P \frac{x+dx, y+dy}{xy}}} \quad (\lim dx = 0, \lim dy = 0).$$

Dieselbe ist eine von x_1, x_2, y_1, y_2 abhängende Form, welche in jeder der beiden Variablenreihen die Dimension 1 hat und für $x = y$ in erster Ordnung verschwindet. Dieselbe hat im Unterschiede von der Weierstrass'schen Primfunktion keine Singularität, erhält aber bei geschlossenen Umläufen der Variablen transcendente Exponentialfaktoren. Durch Einführung von „Mittelformen“ können die letzteren kompensiert werden⁴²⁾.

10. Die Fundamentalgleichung. Die Zerlegung der Grössen des Stammereiches Ω in Primdivisoren des Körpers K wird durch die Untersuchung der *Fundamentalgleichung* geliefert; die Fundamentalgleichung ist diejenige Gleichung n^{ten} Grades, welcher die Fundamentalform

$$(1) \quad y = u_1 y_1 + u_2 y_2 + \dots + u_m y_m$$

und ihre Konjugierten genügen, also die Gleichung:

$$\mathfrak{F}(x; u_1, u_2, \dots, u_m) = (x - y')(x - y'') \dots (x - y^{(n)}) = 0.$$

Ist P ein Primelement des Stammereiches, so ist es zu diesem Zwecke erforderlich, die Funktion \mathfrak{F} , welche eine mit den Unbestimmten $x; u_1, \dots, u_n$ gebildete ganze rationale Form des Stammereiches ist, nach dem Modul P in Primfaktoren zu zerlegen. Dabei heisst eine Funktion \mathfrak{F} nach dem Modul P zerlegbar, wenn eine Kongruenz

$$\mathfrak{F} \equiv XY \pmod{P}$$

aufgestellt werden kann, d. h. wenn $\mathfrak{F} - XY$ durch P teilbar ist; X und Y sind ebensolche Funktionen wie \mathfrak{F} . Ist nämlich bei der Zerlegung in Primideale $P = \mathfrak{p}_1^{e_1} \mathfrak{p}_2^{e_2} \dots \mathfrak{p}_r^{e_r}$, so gilt die Kongruenz

$$(2) \quad \mathfrak{F} \equiv P_1^{e_1} P_2^{e_2} \dots P_r^{e_r} \pmod{P},$$

wo $P_1 \dots P_r$ nach dem Modul P nicht weiter zerlegbar sind und die Funktion P_h dem Primideal \mathfrak{p}_h in der Weise entspricht, dass sie durch Einsetzen des Wertes (1) von y in eine durch \mathfrak{p}_h teilbare Form des Körpers K übergeht⁴³⁾.

42) *F. Klein*, Math. Ann. 36 (1890), p. 1; *Klein-Fricke*, Vorlesungen über die Theorie der Modulfunktionen, Leipzig 1892, 2, Abschn. 6, Kap. 1, § 9; *E. Ritter*, Math. Ann. 44 (1894), p. 261.

43) *Kronecker*, Festschrift § 25 für unbestimmt bleibende $u_1 \dots u_m$. *Dedekind*, Gött. Abh. 1878; *Dedekind-Weber*, J. f. Math. 92, § 11 für individuelle Werte von u_1, u_2, \dots, u_m , wo dann der Satz gewisse Einschränkungen erfordert.

Die Diskriminante der Fundamentalgleichung ist eine rationale Form mit den Unbestimmten u_1, \dots, u_m , für welche der grösste gemeinschaftliche Teiler der Koeffizienten gleich der Diskriminante der Gattung ist. Hieraus, in Verbindung mit der Gleichung (2), folgt, dass die Gattungsdiskriminante alle und nur diejenigen Primelemente des Stammbereiches als Faktoren enthält, welche durch das Quadrat eines Primdivisors teilbar sind. Wenn in Gleichung (2) die zu dem Divisor $P_1 P_2 \dots P_r$ gehörige algebraische Form des Körpers K eine Norm besitzt, welche mit P^k äquivalent ist, so ist die in der Gattungsdiskriminante aufgehende Potenz von P im allgemeinen gleich P^{n-k} ; doch lässt der letzte Satz gewisse Ausnahmen zu, wenn P gleichzeitig ein Teiler eines der Exponenten e_1, e_2, \dots, e_r ist⁴⁴⁾.

11. Ausführung der arithmetischen Theorie im Einzelnen.

Die dargelegten Grundzüge der arithmetischen Theorie algebraischer Grössen ist in ihren Prinzipien aus der Theorie der algebraischen Zahlen abstrahiert und hat hier in erster Linie ihre Kraft bewährt (s. I C 4). Eine Ausführung im einzelnen ist sodann denjenigen Körpern algebraischer Funktionen zu Teil geworden, welche von *einer* Veränderlichen abhängen⁴⁵⁾, wodurch diese Theorie mit der der Riemann'schen Flächen in Wechselbeziehung tritt (s. II B 2). Ist $f(s, z) = 0$ die irreduktible Gleichung, durch welche eine über der z -Ebene ausgebreitete n -blättrige Riemann'sche Fläche bestimmt wird, so gehört zu jedem im Endlichen gelegenen Punkte \mathfrak{P} der Riemann'schen Fläche ein Primideal \mathfrak{p} des Körpers der rationalen Funktionen von s und z ; die Norm dieses Primideals ist der zugehörige Primdivisor $z - c$ des Stammbereiches der rationalen Funktionen von z . Hängen in \mathfrak{P} α Blätter der R. Fl. zusammen, so ist $z - c$ durch die α^{te} Potenz von \mathfrak{p} teilbar, und die Gattungsdiskriminante D erhält also (nach Nr. 10) die Potenz $(z - c)^{\alpha-1}$ als Faktor; die Gattungsdiskriminante D enthält hiernach die Normen aller im Endlichen gelegenen Verzweigungspunkte, jede in einer bestimmten durch die Ordnung der Verzweigung angegebenen Potenz. Diese Beziehung wird eine noch engere, wenn man mit *K. Hensel* die Elementarteiler der Determinante \sqrt{D} in Betracht zieht, welche stets gewissen Wurzeln aus ganzen Funktionen von z äquivalent sind. Giebt es nämlich für $z = c$ je einen $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ -blättrigen Verzweigungspunkt, so enthalten die

44) Die in 43) genannten Abhandlungen und *Dedekind*, Gött. Abh. 1882; *K. Hensel*, J. f. Math. 113 (1894), p. 61, 128; Gött. Nachr. 1897, p. 247; J. f. Math. 117 (1898), p. 333.

45) *Dedekind-Weber* 1. c.

Elementarteiler von \sqrt{D} gebrochene Potenzen von $z - c$, deren Exponenten, abgesehen von der Reihenfolge, durch die Sequenzen

$$0, \frac{1}{\alpha}, \frac{2}{\alpha}, \dots, \frac{\alpha-1}{\alpha}, \quad 0, \frac{1}{\beta}, \dots, \frac{\beta-1}{\beta}, \quad 0, \frac{1}{\gamma}, \dots, \frac{\gamma-1}{\gamma}, \dots$$

angegeben werden⁴⁶⁾. Die unendlich fernen Punkte der Riemann'schen Fläche können entweder durch lineare Transformation von z oder indem man $z = \frac{z_1}{z_2}$ in zwei homogene Variabele spaltet, in die Untersuchung einbezogen werden. Die weitere Verfolgung dieser Gesichtspunkte in der Theorie der algebraischen Funktionen führt zur Aufstellung der überall endlichen Integrale des Körpers⁴⁷⁾, sowie zur Beherrschung des Riemann-Roch'schen Satzes⁴⁸⁾ und seiner Konsequenzen, und zur Auflösung der dem algebraischen Gebilde $f(s, z) = 0$ eigenen Singularitäten⁴⁹⁾.

Auf die Theorie der zu einem Systeme von Grundformen gehörigen Invarianten hat die Körpertheorie *D. Hilbert* angewandt [II B 2, Nr. 6]. Die Gesamtheit dieser Invarianten bildet einen Körper, aus welchem man κ ganze rationale Invarianten $J_1, J_2, \dots, J_\kappa$ so auswählen kann, dass jede weitere ganze rationale Invariante eine ganze algebraische Funktion eines durch $J_1, J_2, \dots, J_\kappa$ und eine weitere Invariante J bestimmten Funktionenkörpers ist. Die Zahl κ ist dabei gleich dem Überschuss der Anzahl der Koeffizienten der Grundform über die Anzahl der Parameter der kontinuierlichen Gruppe der linearen Transformationen; der Grad k des Invariantenkörpers lässt sich mit Hilfe der später zu erwähnenden charakteristischen Funktion eines Formensystemes in den einfachsten Fällen bestimmen. Da die Invarianten $J_1, J_2, \dots, J_\kappa$ hiernach die Eigenschaft haben, dass ihr Verschwinden das Verschwinden aller Invarianten zur Folge hat, so kann die Aufgabe der Bestimmung eines vollständigen Systemes der Invarianten der Grundform zurückgeführt werden auf die Aufstellung gewisser „kanonischer Nullformen“, welche dadurch charakterisiert sind, dass ihre sämtlichen Invarianten verschwinden und dass umgekehrt jede

46) J. f. Math. 115, p. 254 (1895). Analoge Sätze gelten nach noch nicht vollständig publicierten Untersuchungen *K. Hensel's* auch in dem Falle, dass der Stammereich Ω der Körper der rationalen Funktionen *mehrerer* Veränderlicher oder ein Gattungsbereich ist. J. f. Math. 117, p. 333, 346; 118, p. 173 (1897, 98).

47) *Hensel*, J. f. Math. 117, p. 29 (1896).

48) *G. Landsberg*, Math. Ann. 50, p. 333, 577 (1897).

49) *Kronecker*, J. f. Math. 91, p. 301 (1881) = Werke 2, p. 193; vgl. *F. Klein's* autographierte Vorlesung über Riemann'sche Flächen 1891—92, Gött., I. Teil, Abschnitt 4 u. 5.

Form mit verschwindenden Invarianten in eine von ihnen transformiert werden kann⁵⁰⁾).

12. Zusammenhang mit der Theorie der Modulsysteme und algebraischen Gebilde. Die Sätze von Nr. 10 lehren, dass die Zerlegung eines Primdivisors P des Stammereiches \mathfrak{Q} in algebraische Primdivisoren des Körpers K zurückgeführt werden kann auf die Zerlegung ganzer *rationaler* Funktionen nach dem Primmodul P . Die Theorie der algebraischen Körper tritt hierdurch in Beziehung mit der ganz im rationalen Gebiete operierenden *Theorie der Modulsysteme*, von welcher auch die weitere Ausgestaltung der Körpertheorie abhängig erscheint.

13. Elementare Eigenschaften der Modulsysteme. Sind $M, M_1, M_2, \dots M_k$ ganze Funktionen der unabhängigen Veränderlichen $x_1, x_2, \dots x_n$, so heisst M durch das *Modulsystem*

$$\mathfrak{M} = (M_1, M_2, \dots M_k)$$

teilbar, falls eine Gleichung besteht:

$$(1) \quad M = X_1 M_1 + X_2 M_2 + \dots + X_k M_k,$$

in welcher $X_1, X_2, \dots X_k$ ebenfalls ganze Funktionen von $x_1, x_2, \dots x_n$ sind⁵¹⁾. Dabei können die Koeffizienten von $X_1, X_2, \dots X_k$ entweder einem bestimmten Rationalitätsbereiche oder einem bestimmten Integritätsbereiche zugewiesen werden, welchem auch die Koeffizienten von $M_1, \dots M_k$ angehören müssen. Diesen beiden Fällen entsprechend unterscheiden wir gelegentlich zwischen einer *Teilbarkeit erster Art* und *zweiter Art*⁵²⁾. Wenn die Differenz zweier Funktionen $M - M'$ durch \mathfrak{M} teilbar ist, so heissen M und M' einander kongruent nach dem Modulsystem \mathfrak{M} : $M \equiv M' \pmod{\mathfrak{M}}$.

Das Modulsystem $\mathfrak{N} = (N_1, N_2, \dots N_h)$ heisst durch \mathfrak{M} teilbar, falls jede seiner Funktionen durch \mathfrak{M} teilbar ist. Sind zwei Modulsysteme durch einander teilbar, so heissen sie (absolut) *äquivalent*, weil die Gesamtheit der durch das eine und der durch das andere Modulsystem teilbaren Funktionen dieselbe ist. Sind \mathfrak{M} und \mathfrak{N} beliebige Modulsysteme, so hat man hiernach unter dem *grössten gemeinsamen Teiler* der beiden Modulsysteme das Modulsystem

$$\mathfrak{Q} = (\mathfrak{M}, \mathfrak{N}) = (M_1, M_2, \dots M_k, N_1, \dots N_h)$$

50) Math. Ann. 42, p. 313 (1892).

51) Festschrift § 20.

52) Diese Unterscheidung, welche von Kronecker nicht ausdrücklich gemacht wird, wird notwendig, sobald es sich um die strenge Einführung des Stufenbegriffes handelt.

zu verstehen. Andererseits hat man unter dem kleinsten gemeinschaftlichen Vielfachen von \mathfrak{M} und \mathfrak{N} dasjenige Modulsystem zu verstehen, welches der grösste gemeinsame Teiler aller sowohl durch \mathfrak{M} als durch \mathfrak{N} teilbaren Modulsysteme ist.

Aus zwei Modulsystemen \mathfrak{M} und \mathfrak{N} kann man ein *Produkt* bilden:

$$\mathfrak{P} = \mathfrak{M} \cdot \mathfrak{N} = (M_1 N_1, \dots, M_k N_1, M_1 N_2, \dots, M_k N_2, \dots, M_k N_h),$$

durch welches jedes Produkt einer durch \mathfrak{M} und einer durch \mathfrak{N} teilbaren Funktion und jede Summe solcher Produkte teilbar ist. Das Produkt zweier Modulsysteme ist durch jeden seiner Faktoren teilbar; aber wenn ein Modulsystem \mathfrak{P} durch \mathfrak{M} teilbar ist, braucht es nicht als Produkt von \mathfrak{M} und einem zweiten Modulsystem \mathfrak{N} darstellbar zu sein⁵³⁾.

14. Der Stufenbegriff. Primmodulsysteme. Für die weitere Untersuchung ist die Einführung des Begriffes der *Stufe* oder des *Ranges* fundamental. Mit jedem Modulsystem \mathfrak{M} ist ein System von Gleichungen $M_1 = 0, M_2 = 0, \dots, M_k = 0$ gegeben, durch welches ein *algebraisches Gebilde* aus der Mannigfaltigkeit der Variablen x_1, \dots, x_n ausgeschieden wird. Werden durch diese Gleichungen ν Variablen als algebraische Funktionen der frei bleibenden $n - \nu$ übrigen Variablen bestimmt, so heisst das Gleichungssystem von der ν^{ten} *Stufe*, und es definiert alsdann eine $(n - \nu)$ -fache Mannigfaltigkeit. Das Gleichungssystem kann aber auch Mannigfaltigkeiten verschiedener Dimension nebeneinander definieren, in welchem Falle das Modulsystem ein gemischtes heisst und mehrere Stufenzahlen erhält. Wenn insbesondere die Funktionen M_x *lineare homogene* Funktionen der Variablen x_1, \dots, x_n sind, so ist die Stufenzahl des Gleichungssystems identisch mit der in der Determinantentheorie angewendeten Stufen- oder Rangzahl der Matrix der Koeffizienten: $\left| \frac{\partial M_x}{\partial x_\nu} \right| \quad \begin{matrix} (x = 1, 2, \dots, k) \\ (\nu = 1, 2, \dots, n) \end{matrix}$, (dem höchsten Grade nicht verschwindender Unterdeterminanten, vgl. I A 2, Nr. 24; I B 1 b, Nr. 9, 26).

Die Bestimmung der Stufenzahl geschieht durch die allgemeine Theorie der Elimination [s. I B 1 b, Nr. 6—9]⁵⁴⁾. Kronecker führt, um die

53) Festschrift §§ 20 u. 21.

54) Kronecker legt im wesentlichen die allgemeine Eliminationstheorie *Et. Bezout's* (Théorie générale des équations algébriques, Paris 1779) zu Grunde, welche in den Lehrbüchern von J. A. Serret (Algebra, deutsch v. Wertheim 1868, I, Kap. 4) und Faà di Bruno (Théorie générale de l'élimination, Paris 1859) in modernerer Weise durchgeführt ist. Ausführungen zur allgemeinen Theorie der Elimination, welche in neuerer Zeit wenig bearbeitet zu sein scheint, geben

Gleichungssysteme verschiedener Stufe von einander zu sondern, eine mit n Unbestimmten u_1, \dots, u_n gebildete Hilfsgrösse $x = u_1 x_1 + \dots + u_n x_n$ ein, eine Operation, welche der Einführung der „Gleichung“ eines Punktes in der analytischen Geometrie analog ist⁵⁵), und verfährt dann folgendermassen. Es wird mit Hilfe der Grösse x aus den Gleichungen $M_1 = 0, \dots, M_k = 0$ die Variable x_n eliminiert und aus den entstehenden Gleichungen ihr grösster gemeinschaftlicher Teiler $F_1(x; x_1, \dots, x_{n-1})$ herausgehoben; derselbe giebt, gleich Null gesetzt, die *Resolvente erster Stufe*, da x als algebraische Funktion von x_1, \dots, x_{n-1} dargestellt wird. Aus dem von dem gemeinsamen Faktor befreiten Gleichungssystem werden mit Hilfe neuer Unbestimmter $U_1, \dots, U_k, V_1, \dots, V_k$ zwei lineare homogene Verbindungen gebildet; sodann wird x_{n-1} eliminiert und aus den Koeffizienten der als Eliminationsresultat entstehenden Funktion der U und V wieder der grösste gemeinsame Teiler $F_2(x; x_1, \dots, x_{n-2})$ herausgehoben; derselbe giebt, gleich Null gesetzt, die *Resolvente zweiter Stufe*, da x_{n-1} und x_n als algebraische Funktionen der übrigen Variablen bestimmt werden. So fortfahrend, erhält man die Resolventen erster, zweiter, \dots, ν^{ter} Stufe $F_1(x; x_1, \dots, x_{n-1}) = 0, F_2(x; x_1, \dots, x_{n-2}) = 0, \dots, F_\nu(x; x_1, \dots, x_{n-\nu}) = 0$ und ihr Produkt $F_1 F_2 \dots F_\nu$, die *Gesamtresolvente* des Systemes. Setzt man in einer Resolvente für x seinen Wert $\sum u_h x_h$, so erhält man durch die Koeffizienten der so erscheinenden Funktion von u_1, \dots, u_n ein jener Resolvente äquivalentes Gleichungssystem. Da man in der Gesamtresolvente für die Unbestimmten u_1, \dots, u_n stets $n + 1$ Wertsysteme $u_1 = a_1^{(h)} \dots u_n = a_n^{(h)}$ ($h = 1, 2, \dots, n + 1$) so einsetzen kann, dass die entstehenden $n + 1$ Gleichungen nur durch das Verschwinden aller Koeffizienten befriedigt sein können, so folgt: Jedes Gleichungssystem mit n Variablen ist stets durch ein System von höchstens $(n + 1)$ Gleichungen ersetzbar⁵⁶).

J. Molk, Acta math. 6, p. 1 (1885) und *J. Hadamard*, Acta math. 20, p. 201 (1896); vgl. auch *Borel et Drach*, Introduction à l'étude de la théorie des nombres et de l'algèbre supérieure, Paris 1895, p. 205 ff. Eine vollständige Übersicht über alle bisherigen Ergebnisse der Eliminationstheorie giebt neuerdings *Netto* in der 1. Lief. des 2. Bandes seiner Algebra.

55) Die Einführung dieser Hilfsgrösse geht bereits auf *S. D. Poisson* (Éc. polyt. J. cah. XI, p. 199 [1811]) und *J. Liouville* (J. de math. t. XII, p. 68 [1847]) zurück.

56) Festschrift § 10. *K. Th. Vahlen* hat an dem Beispiele einer rationalen Raumkurve 5. Ordnung mit einer Quadrisekante ($n = 3$), welche erst als Schnitt von vier Flächen isoliert werden kann [III C 7], gezeigt, dass die Maximalzahl $n + 1$ unter Umständen wirklich erreicht wird (J. f. Math. 108, p. 346, 1891).

Das Modulsystem $\mathfrak{M} = (M_1, M_2, \dots, M_k)$ erhält dieselbe Stufenzahl, wie das zugehörige Gleichungssystem, falls es sich um die Teilbarkeit erster Art handelt. Sind aber M_1, \dots, M_k ganze *ganzzahlige* Funktionen und sollen auch die Koeffizienten X_1, \dots, X_k in Gleichung (1) der Nr. 13 als ganze ganzzahlige Funktionen bestimmt werden, so erhält man die Stufenzahl des Modulsystems, indem man die des Gleichungssystems um eine Einheit erhöht. Während also im ersten Falle die höchste Stufenzahl n ist, ist sie im Falle der Teilbarkeit zweiter Art $n + 1$.⁵⁷⁾

Der Stufenbegriff ist für die Definition des *Primmodulsystems* massgebend. Betrachtet man die Modulsysteme mit einer bestimmten Anzahl von Veränderlichen und von bestimmter Stufe, so heisst ein solches ein *Primmodulsystem* oder ein *irreduktibles System*, falls alle Modulsysteme, die in ihm enthalten sind, entweder mit ihm äquivalent oder von höherer Stufe sind⁵⁸⁾. Wenn ein Produkt zweier Faktoren durch ein Primmodulsystem teilbar ist, so ist einer der beiden Faktoren durch das Primmodulsystem teilbar.

Ein Gleichungssystem heisst irreduktibel, falls das zugehörige Modulsystem irreduktibel ist, eine Definition, welche die früher gegebene ersetzen kann (s. Nr. 3).

Der Fall, dass ein Gebilde ν^{ter} Stufe zu seiner Darstellung mehr als ν Gleichungen erfordert, tritt besonders häufig dann auf, wenn das Gebilde durch das Verschwinden sämtlicher Determinanten r^{ter} Ordnung einer gegebenen Matrix bestimmt wird. Die Theorie derartiger „beschränkter Gleichungssysteme“ ist vorzugsweise von *A. Cayley*, *G. Salmon*, *S. Roberts*, *A. Brill* ausgebildet worden⁵⁹⁾. Das Hauptinteresse war hierbei der Bestimmung der „Ordnung“ eines derartigen Gleichungssystems zugewendet; Ordnung eines Gleichungssystems ν^{ter} Stufe ist die Anzahl der Punkte, welche das zugehörige algebraische Gebilde mit einem linearen Gleichungssystem $(n - \nu)^{\text{ter}}$ Stufe gemein hat. Dasselbe Ziel verfolgt mit abzählenden Methoden

Für $n = 2$ steht der Satz in Übereinstimmung mit dem *Dedekind-Weber'schen* Satze, dass jedes Ideal des Funktionenkörpers als grösster gemeinsamer Teiler zweier Hauptideale dargestellt werden kann (J. f. Math. 92, § 9, 2).

57) Festschrift § 21 (Ende), § 22 VII. J. f. Math. 99 (1886), p. 336.

58) So ist die inkorrekte Begriffsbestimmung der Festschrift (§ 21, VI) im J. f. Math. 99, p. 337 (1885) modifiziert worden.

59) *A. Cayley*, Math. Papers 1, p. 457 = Camb. and Dubl. math. J. 4, p. 132 (1849); *G. Salmon*, Lessons introductory to the modern higher Algebra, 2. ed. I. XXII u. XXIII (deutsch v. *W. Fiedler*, 2. Aufl. 1877); *S. Roberts*, J. f. Math. 67 (1867), p. 266; *A. Brill*, Math. Ann. 5, p. 378 (1872); 36, p. 321 (1890). S. noch *W. Fr. Meyer*, Bremer Naturf.vers. Verh. 1890.

in seiner Geometrie der Anzahl *H. Schubert*, dessen Resultate aber genauerer Nachprüfung bedürfen⁶⁰).

15. Zerlegung in Primmodulsysteme. Diskriminante eines Modulsystemes. Es entsteht die Frage, ob ein gegebenes Modulsystem als ein Produkt von Primmodulsystemen darstellbar ist. Dies ist im allgemeinen nicht möglich, gelingt aber unter gewissen Bedingungen, deren wichtigste die folgende ist. Bildet man zu einem reinen Modulsystem⁶¹) $\mathfrak{M} = (M_1, \dots M_k)$ ν^{ter} Stufe die Resolvente $\mathfrak{F}(x; x_1, \dots x_{n-\nu})$ und ermittelt die Diskriminante der Resolvente (in Bezug auf x), so ist dies eine Funktion von $x_1, \dots x_{n-\nu}$, welche die *Diskriminante des Modulsystemes* heisst⁶²) und deren identisches Verschwinden charakteristisch dafür ist, dass die mehrfachen Punkte der Mannigfaltigkeit $M_1 = \dots = M_k = 0$ eine Mannigfaltigkeit gleich hoher Stufe bilden. Verschwindet die Diskriminante des Modulsystemes nicht, so kann man dasselbe als Produkt von Primmodulsystemen darstellen, eine Zerlegung, welche der Zerlegung der Resolvente in Primfaktoren genau parallel verläuft⁶³).

Wenn der Rang des Modulsystemes \mathfrak{M} gleich n ist, so hat *E. H. Moore* gezeigt, dass man dasselbe stets — einerlei ob seine Diskriminante von Null verschieden ist oder nicht — als ein Produkt von „einfachen“ Modulsystemen darstellen kann; ein einfaches Modulsystem ist hierbei ein solches, dessen Funktionen nur für einen einzigen Punkt $(\xi_1, \dots \xi_n)$ Null werden⁶⁴) (vgl. Nr. 21).

Verschwindet die Diskriminante eines Modulsystemes \mathfrak{M} , so giebt es stets eine ganze Funktion X , die selbst nicht durch \mathfrak{M} teilbar ist, von welcher aber eine Potenz durch \mathfrak{M} teilbar wird — und umgekehrt. Charakteristische Eigenschaft der Nicht-Primmodulsysteme

60) Kalkül der abzählenden Geometrie, Leipzig 1879. Das Prinzip der „Erhaltung der Anzahl“, welches den Schubert'schen Abzählungen zu Grunde liegt, ist nach einer Bemerkung *F. Klein's* algebraisch formulierbar; s. *Weber*, Algebra 1, § 51.

61) Es handelt sich von jetzt ab bis auf weiteres um Teilbarkeit erster Art.

62) *J. Molk*, Acta math. 6, chap. IV.

63) Die Diskriminante eines Modulsystemes kann auch als Eliminationsresultante besonderer Gleichungssysteme definiert werden; *Kronecker*, Berl. Sitzungsber. 1888, p. 451 X. Der hier definierte Begriff der Diskriminante ist übrigens genau zu scheiden von dem, was man in der analytischen Geometrie die Diskriminante einer Kurve, Fläche (allgemein einer Mannigfaltigkeit erster Stufe) nennt; dies ist diejenige irreduktible Funktion der Koeffizienten, deren Verschwinden das Auftreten von Singularitäten, d. i. die Existenz einer Mannigfaltigkeit mehrfacher Punkte von *höherer* Stufe anzeigt.

64) N. Y. Bull. (2) 3 (1897); 10, p. 372.

ist es hiernach, dass stets zwei ganze Funktionen existieren, die nicht durch das Modulsystem teilbar sind, in deren Produkt aber das Modulsystem aufgeht⁶⁵).

Verschwindet die Diskriminante des Modulsystemes \mathfrak{M} nicht, so giebt sie, gleich Null gesetzt, diejenigen Werte von x_1, \dots, x_{n-v} , zu welchen mehrfache Punkte der Mannigfaltigkeit \mathfrak{M} gehören. Diese, die *Diskriminantenmannigfaltigkeit* (*Diskriminantenfläche*) ist alsdann eine unter \mathfrak{M} enthaltene Mannigfaltigkeit höherer Stufe. In dem besonderen Falle einer Gleichung n^{ten} Grades mit einer Unbekannten und $n+1$ homogenen unbestimmten Koeffizienten (wobei die n Wurzeln als Funktionen der $n+1$ Gleichungskoeffizienten zu betrachten sind) hat Hilbert⁶⁶) die Diskriminantenmannigfaltigkeit auf Ordnung und Beschaffenheit ihrer Singularitäten untersucht; die Bedeutung der Diskriminantenmannigfaltigkeit für die Realität der Wurzeln hat Kronecker in Betracht gezogen⁶⁷).

16. Anwendungen der Modulsysteme. Komplexe Zahlen mit mehreren Einheiten. Wenn zwei Modulsysteme $\mathfrak{M} = (M_1, M_2, \dots, M_k)$ und $\mathfrak{M}' = (M'_1, \dots, M'_k)$ äquivalent sind, so sind auch die zugehörigen Gleichungssysteme äquivalent, d. h. jede Lösung des einen Systemes ist auch eine solche des anderen. Umgekehrt führen oftmals Gleichungssysteme, deren Äquivalenz von vornherein bekannt ist, auf äquivalente Modulsysteme. Z. B. lässt sich die Bedingung dafür, dass zwei quadratische Systeme von je n^2 Elementen reciprok sind, in zweifacher Weise durch n^2 Gleichungen ausdrücken und die entsprechenden Modulsysteme von je n^2 Funktionen lassen sich als äquivalent erweisen⁶⁸). Ebenso führt die Annahme, dass ein quadratisches System von n^2 Elementen orthogonal ist, auf zwei verschiedene Modulsysteme von je $\frac{1}{2}n(n+1)$ Elementen, deren Äquivalenz erwiesen werden kann⁶⁹). In ähnlicher Weise lässt sich die Bedingung dafür, dass zwei ganze Funktionen n^{ten} Grades $\mathfrak{B}(x)$ und $V(x)$ von x einen grössten gemeinsamen Teiler m^{ten} Grades $W^{(m)}(x)$ haben, so umsetzen, dass bei unbestimmten Koeffizienten $W^{(m)}(x)$ als grösster gemeinschaftlicher Teiler von $\mathfrak{B}(x)$ und $V(x)$ nach einem gewissen Modul-

65) Kronecker, Berl. Sitzungsber. 1888, p. 453 ff., XII—XV.

66) Math. Ann. 30 (1887), p. 437 (I B 1 b, Nr. 18).

67) Berl. Monatsberichte 1878, p. 95 = Werke 2, p. 37 (Ende). Vgl. Weber, Algebra 1, § 78.

68) Kronecker, J. f. Math. 107 (1890), p. 254; Netto, J. f. Math. 108, p. 144 f. (1891).

69) Kronecker, Berl. Sitzungsber. 1890, IX u. X; J. f. Math. 107 l. c.

systeme \mathfrak{M} dargestellt werden kann, dessen Elemente aus ganzen Funktionen der Koeffizienten von $\mathfrak{B}(x)$ und $V(x)$ bestehen, welche, gleich Null gesetzt, eben jene Bedingung für die Existenz des Teilers m^{ter} Ordnung ergeben⁷⁰⁾. Der Gewinn dieser Betrachtungsweise besteht darin, dass man die für den grössten gemeinsamen Teiler zweier ganzer Funktionen geltenden Sätze ohne weiteres auf Kongruenzen nach irgend welchem Primmodulsysteme übertragen, also z. B. die Bedingung dafür aufstellen kann, dass zwei ganze ganzzahlige Funktionen von x modulo einer Primzahl p einen grössten gemeinsamen Teiler m^{ten} Grades haben. —

Eine andere Anwendung der Modulsysteme besteht in der Aufstellung aller Systeme komplexer Zahlen mit mehreren Einheiten, in welchen kommutative Multiplikation stattfindet (s. I A 4). Jedes reine Modulsystem \mathfrak{M} n^{ter} Stufe mit n Variablen besitzt ein endliches Restsystem, d. h. es giebt ν ganze Funktionen f_1, f_2, \dots, f_ν , sodass jede ganze Funktion f der n Variablen auf eine und nur eine Weise in die Form gesetzt werden kann:

$$f \equiv c_0 + c_1 f_1 + c_2 f_2 + \dots + c_\nu f_\nu \pmod{\mathfrak{M}},$$

wo c_0, c_1, \dots, c_ν Konstanten bedeuten. Da hiernach auch jedes Produkt $f_g f_h$ einer linearen Funktion von f_1, \dots, f_ν kongruent ist, so erhält man, wenn man f_1, \dots, f_ν durch ν komplexe Einheiten e_1, \dots, e_ν und die Kongruenz durch eine Gleichung ersetzt, ein komplexes Zahlssystem mit $(\nu + 1)$ Einheiten $1, e_1, \dots, e_\nu$ und vertauschbarer Multiplikation. Umgekehrt hat *Kronecker* gezeigt, dass jedes derartige Zahlssystem auf ein Modulsystem ν^{ter} Stufe mit ν Variablen führt⁷¹⁾. Die von *K. Weierstrass*⁷²⁾, *R. Dedekind*⁷³⁾, *J. Petersen*⁷⁴⁾ vorher betrachteten Fälle komplexer Zahlssysteme beziehen sich auf solche Modulsysteme, deren Diskriminante von Null verschieden ist.

17. Dedekind's Theorie der Moduln. An die Stelle der Modulsysteme tritt in der *Dedekind'schen* Theorie die Theorie der Moduln, welche jedoch nicht in gleicher Allgemeinheit ausgearbeitet vorliegt, sondern dem jeweiligen Zwecke der Untersuchung angepasst ist.

70) *Kronecker*, J. f. Math. 99, p. 328 (1886) für die Methode der rekurrenten Reihen; *Netto*, J. f. Math. 104, p. 321; 106, p. 81 (1889/90); *Hamburger Festschrift* 1890, p. 36 für die *Euler'sche* Eliminationsmethode (I B 1 b, Nr. 9).

71) *Kronecker*, Berl. Sitzungsber. 1888: zur Theorie der allgemeinen komplexen Zahlen und der Modulsysteme (p. 429. 447. 557. 595. 983).

72) *Gött. Nachr.* 1884, p. 395 = *Werke* 2, p. 311.

73) *Gött. Nachr.* 1885, p. 141; 1887, p. 1.

74) *ibid* 1887, p. 489

Ein System von unendlich vielen Zahlen heisst ein (*Zahlen-Modul*), falls mit irgend zwei Zahlen auch ihre Summe und ihre Differenz dem Systeme angehört⁷⁵⁾. Von besonderer Wichtigkeit sind die *endlichen Moduln* $[\alpha_1, \alpha_2, \dots \alpha_n]$, welche aus allen Summen ganzzahliger Vielfacher von $\alpha_1, \alpha_2, \dots \alpha_n$ bestehen. Zwei Zahlen ρ und σ heissen einander kongruent nach dem Modul α ($\rho \equiv \sigma \pmod{\alpha}$), falls die Differenz $\rho - \sigma$ dem Modul α angehört; alle Zahlen, welche einander kongruent sind, werden in eine *Zahlklasse* mod. α zusammengefasst. Ein Modul α heisst durch einen Modul β teilbar, wenn jede Zahl von α auch dem Modul β angehört. Zu irgend zwei Moduln α und β giebt es einen grössten gemeinsamen Teiler δ und ein kleinstes gemeinsames Vielfaches m ; der erste Modul (δ) besteht aus allen Zahlen, welche als Summe einer Zahl aus α und einer Zahl aus β dargestellt werden können (in Zeichen $\delta = \alpha + \beta$), der zweite (m) aus allen Zahlen, welche sowohl dem Modul α als dem Modul β angehören (i. Z. $m = \alpha - \beta$). Aus irgend zwei Moduln α und β kann man ein Produkt $\alpha\beta$ und einen Quotienten $\frac{\alpha}{\beta}$ bilden; das Produkt besteht aus allen Produkten einer Zahl aus α und einer Zahl aus β und allen Summen derartiger Produkte, der Quotient besteht aus allen Zahlen μ , für welche der Modul $\mu\beta$ durch α teilbar wird. Von besonderer Wichtigkeit ist der Fall, wenn zwei Moduln α und β zu einander in einer solchen Beziehung stehen, dass der Modul α in eine endliche Anzahl von s Zahlklassen aufgelöst werden kann, deren jede lauter einander nach dem Modul β kongruente Zahlen enthält; die Zahl s wird dann durch (α, β) bezeichnet⁷⁶⁾. Auf diesen grundlegenden Begriffen und den daraus folgenden Gesetzen beruht die Dedekind'sche Theorie der in einem Zahlkörper enthaltenen Ideale.

In der Theorie der Zahlkörper treten während der ganzen Dauer einer Untersuchung überhaupt nur solche endliche Moduln auf, welche Vielfache eines als fest anzunehmenden Moduls $\mathfrak{o} = [\omega_1, \omega_2, \dots \omega_n]$ sind. Jedem derartigen Modul $[\alpha_1, \alpha_2, \dots \alpha_n] = \mathfrak{a}$ entspricht eine bestimmte Matrix A der zu den Zahlen α gehörigen ganzzahligen Koeffizienten und wenn \mathfrak{a} teilbar durch β ist, so stehen auch die ent-

75) Zahlentheorie §§ 168—172.

76) Eine Verallgemeinerung des Modulbegriffes und des Symboles (α, β) in dem Sinne, dass in der Linearform $x_1 \alpha_1 + x_2 \alpha_2 + \dots + x_n \alpha_n$, die zu dem Modul $[\alpha_1, \dots \alpha_n]$ gehört, die Koeffizienten $x_1, \dots x_n$ beliebige ganze Zahlen eines Zahlkörpers sein dürfen, giebt *Dedekind* in den Gött. Nachrichten v. 1895 (p. 183).

sprechenden Matrices A und B in einer Teilbarkeitsbeziehung. Die Theorie der Moduln tritt hierdurch in Zusammenhang mit der von *G. Frobenius* ausgebildeten Theorie der linearen Formen mit ganzzahligen Koeffizienten [I C 1]; die hieraus für die Theorie der Moduln zu gewinnenden Resultate hat *E. Steinitz* einer Bearbeitung unterzogen⁷⁷⁾.

Analoge Sätze gelten auch für *Funktionenmoduln*. Hier haben *Dedekind* und *Weber* den Fall behandelt, dass die Basis des Moduls $[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]$ aus algebraischen Funktionen einer Veränderlichen x besteht, und dass die Koeffizienten x_1, \dots, x_n der Linearform $x_1 \alpha_1 + \dots + x_n \alpha_n$ irgend welche ganze rationale Funktionen von x sind⁷⁸⁾.

18. Sätze von Hilbert. Einen wesentlichen Fortschritt hat die Theorie der Modulsysteme durch einige Sätze von *D. Hilbert* erfahren, welche die Bedingungen feststellen, unter denen ein vorgelegtes System von unendlich vielen Funktionen auf ein Modulsystem zurückführbar ist. Die Sätze von Hilbert beziehen sich, ihren invariantentheoretischen Zwecken gemäss, zunächst auf ganze rationale *homogene* Funktionen von n Variabeln, und es ist also der Ausdruck „Form“ im folgenden wieder in der üblichen Bedeutung der Invariantentheorie zu verstehen. Ein System von Formen wird ein Modul genannt, wenn jedes Produkt einer Form des Systemes mit einer beliebigen anderen, nicht notwendig zum System gehörigen Form, sowie jede in den Veränderlichen x_1, \dots, x_n homogene Summe solcher Produkte wiederum dem System angehört. Nun gelten folgende drei Hauptsätze⁷⁹⁾:

I. Aus jedem beliebigen Formensysteme (also auch aus jedem Modul) lassen sich stets m Formen F_1, F_2, \dots, F_m so auswählen, dass jede andere Form F des Systemes durch lineare Kombination jener ausgewählten Formen erhalten werden kann:

$$F = A_1 F_1 + A_2 F_2 + \dots + A_m F_m.$$

Dieser Satz gilt auch noch, wenn das Formensystem aus *ganzzahligen* Formen besteht und wenn die Koeffizienten A_1, \dots, A_m der gleichen Forderung unterworfen werden⁸⁰⁾.

77) *G. Frobenius*, J. f. Math. 86, p. 174; 88, p. 96 (1878/79); *E. Steinitz*, Math. Ann. 52, p. 1 (1899).

78) J. f. Math. 92, p. 194—206 (§§ 4—6).

79) Satz I und II und seine Konsequenzen in Math. Ann. 36, p. 473 (1890); Satz III und seine Anwendungen Math. Ann. 42, p. 313 (1892) [I B 2, Nr. 6].

80) Weitere Ausführungen zu diesem Satze geben *P. Gordan*, Math. Ann. 42, p. 132 (1892); *A. Capelli*, Nap. R. (3) 2 (1896), p. 198, 231 (Erweiterung auf Potenzreihen).

Jeder Modul ist hiernach auf ein Modulsystem zurückführbar; z. B. ist das System der durch eine algebraische Raumkurve hindurchgelegten Flächen von der Art, dass die zugehörigen algebraischen Formen einen Modul bilden und also durch lineare Kombination einer endlichen Anzahl unter ihnen erhalten werden können. Eine weitere Konsequenz ist der auf lineare Gleichungen bezügliche Satz:

Die sämtlichen ganzen Lösungen eines vorgelegten Gleichungssystems:

$$(1) \quad F_{t1}X_1 + F_{t2}X_2 + \cdots + F_{tm^{(1)}}X_{m^{(1)}} = 0 \quad (t = 1, 2, \dots m),$$

in welchem die Koeffizienten $F_{t1}, \dots, F_{tm^{(1)}}$ gegebene Formen von x_1, x_2, \dots, x_n sind, lassen sich aus einer endlichen Anzahl von Lösungen

$$(2) \quad X_1 = X_{1s}, \quad X_2 = X_{2s}, \dots, X_{m^{(1)}} = X_{m^{(1)}s} \quad (s = 1, 2, \dots m^{(2)})$$

linear und homogen in der Gestalt

$$(3) \quad X_h = A_1X_{h1} + A_2X_{h2} + \cdots + A_{m^{(2)}}X_{h,m^{(2)}} \quad (h = 1, 2, \dots m^{(1)})$$

zusammensetzen. Dabei erscheint jedes Lösungssystem im allgemeinen in mehreren Arten in der Gestalt (3), indess lässt sich die Mannigfaltigkeit der verschiedenen Darstellungen eines und desselben Lösungssystems vermöge des folgenden zweiten Hauptsatzes übersehen.

II. Ist ein Gleichungssystem der Gestalt (1) vorgelegt, so führt die Aufstellung der Bedingungen, unter welcher eine Lösung von (1) einer mehrfachen Darstellung (3) fähig ist, zu einem zweiten Systeme von $m^{(1)}$ Gleichungen der nämlichen Gestalt

$$(4) \quad X_{h1}U_1 + X_{h2}U_2 + \cdots + X_{h,m^{(2)}}U_{m^{(2)}} = 0 \quad (h = 1, 2, \dots m^{(1)});$$

aus diesem zweiten Gleichungssysteme entspringt in gleicher Weise ein drittes abgeleitetes Gleichungssystem u. s. f. Das so begonnene Verfahren erreicht bei weiterer Fortsetzung *stets ein Ende* und zwar ist spätestens das n^{te} abgeleitete Gleichungssystem ein solches, welches keine Lösung mehr besitzt. Durch diesen Satz wird es möglich, die Gesamtheit der durch ein gegebenes Modulsystem $[F_1, F_2, \dots F_m]$ teilbaren Formen in der Weise zu übersehen, dass man entscheiden kann, welche Formen *in mehrfacher Weise* als lineare homogene Funktionen von $F_1, \dots F_m$ dargestellt werden können. Es gelingt infolge dessen auch, die Anzahl der *von einander unabhängigen* Bedingungen zu bestimmen, welchen die Koeffizienten einer Form der Ordnung R genügen müssen, damit sie in dem Modul $[F_1, \dots F_m]$ gelegen sei. Diese Zahl ist für genügend grosse Werte der Zahl R eine ganze Funktion von R mit rationalen Zahlkoeffizienten; sie wird *charakteristische Funktion* des Moduls genannt und mit $\chi(R)$ bezeichnet. Ist d

die Dimension des durch die Gleichungen $F_1 = 0, \dots, F_m = 0$ bestimmten algebraischen Gebildes, so ist

$$\chi(R) = \chi_0 + \chi_1 \binom{R}{1} + \chi_2 \binom{R}{2} + \dots + \chi_d \binom{R}{d};$$

hierbei bedeutet $\binom{R}{s}$ die Binomialfunktion $\frac{R \cdot (R-1) \cdot \dots \cdot (R-s+1)}{1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot s}$,

$\chi_0, \chi_1, \dots, \chi_d$ sind ganze, dem Modul $[F_1, F_2, \dots, F_m]$ eigentümliche Zahlen, und zwar ist χ_d die Ordnung des algebraischen Gebildes, d. i. die Anzahl der Wertsysteme, welche das algebraische Gebilde mit einer linearen Mannigfaltigkeit der Dimension $n-1-d$ gemein hat, während $\chi_0, \chi_1, \dots, \chi_{d-1}$ mit den Geschlechtzahlen des algebraischen Gebildes in Zusammenhang stehen.

Die charakteristische Funktion steht in Wechselbeziehung zu den fundamentalen Anzahlbestimmungen der analytischen Geometrie, z. B. ist für eine doppeltpunktslose Raumkurve C von der Ordnung m und dem Geschlechte p $\chi(R) = -p + 1 + mR$ die Anzahl der Bedingungen, welche einer Fläche R^{ter} Ordnung auferlegt werden müssen, damit sie durch C gehe [III C 5, 7]. Bildet man aus zwei Moduln \mathfrak{M} und \mathfrak{N} den grössten gemeinsamen Teiler \mathfrak{D} und das kleinste gemeinsame Vielfache \mathfrak{R} , so ist $\chi_{\mathfrak{M}}(R) + \chi_{\mathfrak{N}}(R) = \chi_{\mathfrak{D}}(R) + \chi_{\mathfrak{R}}(R)$. Gehören \mathfrak{M} und \mathfrak{N} zu zwei doppeltpunktslosen Raumkurven C_m^p und $C_{m'}^{p'}$, welche zusammengenommen den vollständigen Schnitt zweier Flächen F_μ und $F_{\mu'}$ bilden, so ist der Modul $\mathfrak{D} = [F, F']$ das System aller Flächen durch C und C' , der Modul \mathfrak{R} das System aller Flächen durch die Schnittpunkte von C und C' und die zuletzt angegebene Relation liefert die Bestimmung der Anzahl dieser Schnittpunkte aus den Ordnungszahlen μ und μ' und den Geschlechtzahlen p und p' (III C 7). Bringt man ein zu dem Modul $[F_1, F_2, \dots, F_m]$ gehöriges algebraisches Gebilde zum Schnitt mit q allgemeinen Formen $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_q$ der Ordnungen n_1, n_2, \dots, n_q , so ist die charakteristische Funktion $\chi_q(R)$ des Schnittgebildes ausdrückbar durch die charakteristische Funktion $\chi(R)$ des Moduls $[F_1, \dots, F_m]$:⁸¹⁾

81) W. Wirtinger, Untersuchungen über Thetafunktionen, Leipzig 1895. W. bestimmt daselbst die charakteristische Funktion $\chi(R)$ des durch Verallgemeinerung der Kummer'schen Fläche ($p=2$) entstehenden algebraischen Gebildes, welches man erhält, wenn man 2^p linear unabhängige Thetafunktionen 2. Ordnung von $v_1 \dots v_p$ mit der Charakteristik $\begin{vmatrix} 0 & \\ & 0 \end{vmatrix}$ als homogene Punktkoordinaten eines linearen Raumes von $2^p - 1$ Dimensionen betrachtet:

$$\chi(R) = 2^{p-1}(R^p + 1).$$

$$\begin{aligned} \chi_2(R) = \chi(R) - \sum_{i=1}^q \chi(R - n_i) + \sum_{i,k} \chi(R - n_i - n_k) \\ - \sum_{i,k,l} \chi(R - n_i - n_k - n_l) + \dots \end{aligned}$$

($i < k$)
($i < k < l$)

III. Zu diesen Sätzen tritt nun noch ein dritter, durch welchen *allgemein* die Frage entschieden wird, welcher Zusammenhang zwischen zwei Modulsystemen aufgestellt werden kann, falls die entsprechenden Gleichungssysteme äquivalent sind. Dieser Satz lautet: Sind G, G', G'', \dots irgend welche ganze rationale homogene Funktionen von x_1, x_2, \dots, x_n , die für alle diejenigen Wertsysteme dieser Veränderlichen verschwinden, welche die Funktionen des Modulsystemes (F_1, F_2, \dots, F_m) zu Null machen, so ist es stets möglich, eine ganze Zahl r so zu bestimmen, dass jedes Produkt $\Pi^{(r)}$ von r beliebigen Funktionen der Reihe G, G', G'', \dots durch das Modulsystem teilbar ist:

$$\Pi^{(r)} = A_1 F_1 + A_2 F_2 + \dots + A_m F_m. \text{ }^{82)}$$

Auf diese drei Hauptsätze hat Hilbert den Beweis der Endlichkeit des zu einem System ganzer rationaler Formen gehörigen Invariantensystemes, den Beweis der Endlichkeit der zwischen den Invarianten bestehenden irreduktiblen Syzygien, den Satz von der Syzygienkette, welche im Endlichen abbricht, und die Untersuchung des Invariantenkörpers gegründet (vgl. Nr. 11 und I B 2, Nr. 6, 7).

19. Verallgemeinerung des Teilbarkeits- und Äquivalenzbegriffes. Der Satz III von Hilbert zeigt, dass aus der Äquivalenz zweier Gleichungssysteme nicht unbedingt die Äquivalenz der entsprechenden Modulsysteme gefolgert werden darf. Diese Thatsache ward bereits von *Kronecker* an folgendem Beispiele bemerkt: Sind $A_0, A_1, \dots, A_r, B_0, B_1, \dots, B_s$ irgend welche (auch nicht homogene) ganze Funktionen mehrerer Veränderlichen x_1, \dots, x_n und setzt man mit Einführung einer Unbestimmten X

$$\begin{aligned} (1) \quad (A_0 X^r + A_1 X^{r-1} + \dots + A_{r-1} X + A_r) (B_0 X^s + B_1 X^{s-1} + \dots + B_s) \\ = C_0 X^{r+s} + C_1 X^{r+s-1} + \dots + C_{r+s}, \end{aligned}$$

so stellen die $(r+1)(s+1)$ Gleichungen

$$A_0 B_0 = A_0 B_1 = \dots = A_0 B_{s-1} = A_1 B_0 = \dots = A_r B_s = 0$$

an die Veränderlichen x_1, \dots, x_n dieselben Anforderungen, wie die

⁸²⁾ Ein spezieller Fall dieses Satzes ($n=3$) wurde bereits früher von *Netto* erwiesen (Acta math. 7, p. 101 [1886]). *Netto* bestimmt in diesem Falle die Zahl r als die höchste bei den Schnittpunkten der Kurven auftretende Multiplizität; vgl. auch *Netto*, Algebra 2, §§ 427 ff.

$(r + s + 1)$ Gleichungen: $C_0 = C_1 = \dots = C_{r+s} = 0$. Betrachtet man aber die zugehörigen Modulsysteme

$$\mathfrak{AB} = (A_0, A_1, \dots, A_r) (B_0, B_1, \dots, B_s) = (A_\varrho B_\sigma) \quad \begin{matrix} (\varrho = 0, 1, \dots, r) \\ (\sigma = 0, 1, \dots, s) \end{matrix}$$

und

$$\mathfrak{C} = (C_0, C_1, \dots, C_{r+s}),$$

so ist zunächst nur ersichtlich, dass \mathfrak{C} durch \mathfrak{AB} teilbar ist. Zur Erklärung der Äquivalenz stellt Kronecker den Satz auf: Unter Voraussetzung der Geltung der Gleichung (1) ist jedes Element $A_\varrho B_\sigma$ des Modulsystemes \mathfrak{AB} Wurzel einer Gleichung:

$$(2) \quad V^m + G_1 V^{m-1} + G_2 V^{m-2} + \dots + G_m = 0,$$

deren Koeffizienten G_1, \dots, G_m der Reihe nach durch $\mathfrak{C}, \mathfrak{C}^2, \dots, \mathfrak{C}^m$ teilbar sind⁸³). Der gleiche Satz ward, unabhängig von Kronecker, von Dedekind in der Form aufgestellt: Sind unter Voraussetzung der Geltung der Gleichung (1) $\mathfrak{a}, \mathfrak{b}, \mathfrak{c}$ die drei Moduln

$$\mathfrak{a} = [A_0, A_1, \dots, A_r], \quad \mathfrak{b} = [B_0, B_1, \dots, B_s], \quad \mathfrak{c} = [C_0, C_1, \dots, C_{r+s}],$$

so ist

$$\mathfrak{a}^{s+1} \mathfrak{b} = \mathfrak{a}^s \mathfrak{c}, \quad \mathfrak{a} \mathfrak{b}^{r+1} = \mathfrak{b}^r \mathfrak{c}.^{84)}$$

Man kann eine Funktion V , welche einer Gleichung der Form (2) genügt, ebenfalls durch \mathfrak{C} teilbar nennen, wenn man den Teilbarkeitsbegriff erweitert, und dann sagt der Satz von Kronecker einfach wieder die Äquivalenz der beiden Modulsysteme \mathfrak{C} und \mathfrak{AB} aus. Bei dieser Verallgemeinerung des Teilbarkeits- und Äquivalenzbegriffes bleiben die früheren Fundamentalsätze im wesentlichen bestehen. *A. Hurwitz* hat aus dem Satze von Kronecker den Satz abgeleitet: Bedeuten in der Gleichung (1) $A_0, \dots, A_r, B_0, \dots, B_s$ ganze algebraische Zahlen und sind die Zahlen C_0, \dots, C_{r+s} durch eine ganze algebraische Zahl ω teilbar, so ist auch jedes Produkt $A_\varrho B_\sigma$ durch ω teilbar. Auf diesem Satze lässt sich in sehr einfacher Weise die Theorie der Ideale eines Zahlkörpers (oder Funktionenkörpers) aufbauen⁸⁵).

20. Fundamentalsatz von Noether. Wenn eine ganze Funktion $f(x, y)$ zweier Veränderlichen für alle Wertsysteme verschwindet, welche die beiden ganzen Funktionen $\varphi(x, y)$ und $\psi(x, y)$ zu Null machen, so folgt aus dem III. Satze von Hilbert nur, dass $f^r \equiv 0$

⁸³) Berl. Ber. 1883, p. 957 = Werke 2, p. 417; *Molk*, Acta math. 6 (1885), p. 71 ff.

⁸⁴) Prag Deutsche Math. G. M., 1892, p. 1; Gött. Nachr. 1895, p. 106.

⁸⁵) Gött. Nachr. 1894, p. 291, 1895, p. 230.

(modd. φ, ψ) ist; es entsteht die Frage, unter welchen Bedingungen der Exponent $r = 1$ angenommen werden darf. *M. Noether* hat als notwendige und hinreichende Bedingung für das Bestehen der Gleichung

$$f = A\varphi + B\psi$$

die folgende erwiesen: Denkt man sich für irgend einen gemeinsamen Punkt ($x = a, y = b$) der beiden Kurven $\varphi = 0, \psi = 0$ die Funktionen f, φ, ψ, A, B nach Potenzen von $x - a$ und $y - b$ entwickelt, so müssen die linearen Gleichungen, welche sich für die noch unbestimmten Koeffizienten von A und B einstellen, für jeden einzelnen der Schnittpunkte erfüllbar sein. Wenn insbesondere φ einen i -fachen, ψ einen k -fachen Punkt mit getrennten Tangenten in $x = a, y = b$ besitzt, so ist das Vorhandensein eines $(i + k - 1)$ -fachen Punktes für f eine hinreichende Bedingung⁸⁶). Da dieser Satz für die *Brill-Noether'sche* Theorie der algebraischen Funktionen grundlegend ist, so wird er als „Fundamentalsatz“ bezeichnet. Spätere Untersuchungen haben sich mit Vereinfachung des Beweises⁸⁷) und mit Bestimmung derjenigen Dimensionenzahl beschäftigt, bis zu welcher die Vergleichung der Koeffizienten erfolgen muss; *E. Bertini* findet diese Zahl $\alpha' = (\alpha - ik) + (i + k - 2)$, wenn φ einen i -fachen, ψ einen k -fachen Punkt besitzt und die Multiplicität der Schnittstelle $= \alpha$ ($\geq ik$) ist⁸⁸).

21. Modulsysteme zweiter Stufe; ihre Normalformen. Soll der Fundamentalsatz von Noether und die analogen Sätze im Raume von mehr als zwei Dimensionen mit Hilfe der rein arithmetischen Theorie der Modulsysteme gewonnen werden, so ist hierzu eine eingehendere Untersuchung der Modulsysteme zweiter Stufe notwendig. Die hier vorliegenden Untersuchungen knüpfen an diejenigen Modulsysteme zweiter Stufe

$$\mathfrak{M} = (A_1(x), \dots, A_n(x), m)$$

an, welche aus n ganzen ganzzahligen Funktionen von x und einer Zahl m , die mit jenen keinen gemeinsamen Teiler hat, bestehen und bei welchen es sich um Teilbarkeit zweiter Art handelt (s. Nr. 13). Die Hauptresultate sind von hier auf beliebige Modulsysteme zweiter Stufe leicht zu übertragen. Der einfachste Fall ist der, dass die Zahl m eine Primzahl p ist. Dann können die Funktionen A_1, \dots, A_n stets durch eine einzige Funktion $M(x)$ (den grössten gemeinsamen

⁸⁶) Math. Ann. 6, p. 351 (1873).

⁸⁷) *A. Voss*, Math. Ann. 27 (1886), p. 527; *Noether*, Math. Ann. 30 (1887), p. 410; *L. Stickelberger*, ibid. p. 401; *A. Brill*, Math. Ann. 39 (1891), p. 129.

⁸⁸) Math. Ann. 34 (1889), p. 447 und *Lomb. Ist. R.* (2), 24 (1891), p. 1095; *Noether*, Math. Ann. 40 (1892), p. 140.

Teiler nach dem Modul p) ersetzt werden und es gelingt, die Gesetze der gewöhnlichen Zahlentheorie auf diese Modulsysteme zu übertragen, was von *C. F. Gauss*, *J. A. Serret*, *Schönemann*, *Dedekind*⁸⁹⁾ in verschiedenen Richtungen durchgeführt worden ist. Unter diesen Modulsystemen sind die von der Form (P, p) , in welcher die Funktion P nach dem Modul p nicht mehr in Faktoren zerlegt werden kann, von besonderer Wichtigkeit, weil diese Modulsysteme und diese allein *Primmodulsysteme* sind.

Wenn die Zahl m keine Primzahl ist, so handelt es sich in erster Linie darum, das Modulsystem auf eine Normalform zu bringen, vermöge deren es *durch einfache Divisionen* entschieden werden kann, ob eine vorgelegte ganze ganzzahlige Funktion X durch das Modulsystem \mathfrak{M} teilbar ist oder nicht. Nach *K. Hensel* und *G. Landsberg*⁹⁰⁾ kann jedes Modulsystem zweiter Stufe in ein äquivalentes Modulsystem in der Normalform:

$$\mathfrak{N} = (F_1, e_1 F_2, e_2 F_3, \dots, e_{r-1} F_r, e_r)$$

umgewandelt werden, dessen Elemente die folgenden vier charakteristischen Eigenschaften haben:

1) Die höchsten Koeffizienten der Funktionen F_1, \dots, F_r sind gleich 1.

2) Ihre Grade $\gamma_1, \dots, \gamma_r$ bilden eine absteigende Reihe.

3) Jede der Zahlen e_ϱ ist ein eigentlicher Teiler der nächstfolgenden $e_{\varrho+1}$.

4) Wenn $r > 1$, so ist die Funktion F_ϱ (für $\varrho = 1, 2, \dots, r-1$) durch das Modulsystem teilbar:

$$\mathfrak{N}_\varrho = \left(F_{\varrho+1}, \frac{e_{\varrho+1}}{e_\varrho} F_{\varrho+2}, \dots, \frac{e_{r-1}}{e_\varrho} F_r, \frac{e_r}{e_\varrho} \right),$$

welches ebenfalls die Normalform hat. Soll eine Funktion X durch das Modulsystem \mathfrak{N} teilbar sein, so muss der Rest, den X bei der Division durch F_1 ergibt, den Faktor e_1 haben und nach Weglassung dieses Faktors muss die so entstehende Funktion X_1 durch \mathfrak{N}_1 teilbar sein; die Entscheidung, ob X_1 durch \mathfrak{N}_1 teilbar ist, wird dann in gleicher Weise auf die Frage der Teilbarkeit einer Restfunktion X_2 durch das Modulsystem \mathfrak{N}_2 zurückgeschoben u. s. f. Alle einfachen auf das Modulsystem bezüglichen Fragen (z. B. welche Modulsysteme

89) *Gauss*, Werke 2, p. 197 (Nachlass); *Serret*, Algebra 2³; *Schönemann*, J. f. Math. 31, p. 269; 32, p. 92 (1846); *Dedekind*, J. f. Math. 51, p. 1 (1856).

90) *Hensel*, J. f. Math. 118, p. 234; 119, p. 114, 175 (1897/98); *Landsberg*, Gött. Nachr. 1897, p. 277 [I B 1 b, Nr. 26].

in \mathfrak{M} enthalten sind, wieviel inkongruente Funktionen es giebt) finden durch Aufstellung einer solchen Normalform ihre Beantwortung.

Jedes Modulsystem kann auf eine und nur eine Weise in eine Reihe „einfacher“ Modulsysteme zerlegt werden. Ein einfaches Modulsystem ist dadurch charakterisiert, dass nur ein einziges Primmodulsystem (P, p) in ihm aufgeht. Wenn eine Funktion X durch alle in dem Modulsysteme \mathfrak{M} aufgehenden einfachen Modulsysteme teilbar ist, so ist sie auch durch das Modulsystem \mathfrak{M} teilbar.

Stellt man die analogen Sätze für diejenigen Modulsysteme zweiter Stufe auf, welche aus ganzen Funktionen zweier Veränderlichen bestehen und bei welchen es sich um Teilbarkeit erster Art handelt, so ergiebt der letzte Satz den *Noether'schen Fundamentalsatz*.

22. Darstellung algebraischer Gebilde durch rationale Parameter; Satz von Lüroth. Unter den algebraischen Gebilden beherrscht man am vollständigsten die von *einer* Dimension (Kurven im Raume von 2, 3, ... n Dimensionen), weil hier die wohlausgebildete Theorie der algebraischen Funktionen einer Veränderlichen das Mittel abgiebt, alle Eigentümlichkeiten des Gebildes vollständig zu untersuchen⁹¹⁾. Unter diesen Kurven sind diejenigen ausgezeichnet, deren Koordinaten sich als *rationale* Funktionen eines Parameters darstellen und welche sich also umkehrbar eindeutig auf eine gerade Linie beziehen lassen. Solche Kurven heissen *rationale* oder (nach *A. Cayley*)⁹²⁾ *Unikursalkurven*. Ist die Kurve eben und von der n^{ten} Ordnung, so besitzt sie $\frac{1}{2}(n-1)(n-2)$ Doppelpunkte oder eine Anzahl von Singularitäten, welche jenen äquivalent sind, und umgekehrt ist eine Kurve n^{ter} Ordnung mit $\frac{1}{2}(n-1)(n-2)$ Doppelpunkten stets eine rationale Kurve. Diese charakteristische Eigenschaft kann auch dahin ausgesprochen werden, dass es kein auf die Kurve bezügliches Abel'sches Integral erster Gattung giebt oder dass das Geschlecht Null ist, und diese Begriffsbestimmung hat den Vorzug, dass sie für Kurven mit beliebigen Singularitäten gilt, und ohne weiteres auf Kurven im Raume von mehr als zwei Dimensionen übertragen werden kann (s. II B 2).

R. F. A. Clebsch hat sich nächst den rationalen Kurven auch mit den Flächen beschäftigt, welche umkehrbar eindeutig auf eine Ebene

91) Grundlegend für die Untersuchung der Raumkurven mit Hilfe d. Th. d. alg. F. sind die Arbeiten von *Noether*, Berl. Abh. 1883, Auszug in J. f. Math. 93, p. 271 (1882) u. *G. Halphen*, J. Éc. polyt. vol. 33, cah. 52, p. 1 (1882).

92) London Math. Soc. 1, p. 1, Oct. 1865 = Coll. Pap. 6, p. 1. Vgl. *W. Fr. Meyer*, Apolarität und rationale Kurven, Tüb. 1883 [III C 3].

abbildbar sind und deren Koordinaten hiernach als rationale Funktionen zweier Parameter dargestellt werden können⁹³). Die allgemeinen Bedingungen, welche eine Fläche erfüllen muss, damit ihre Koordinaten eine derartige Darstellung zulassen, hat *M. Noether* angegeben⁹⁴). Es muss erstens auf der Fläche eine Schar rationaler Kurven existieren; unter dieser Voraussetzung ist das sogenannte *Flächengeschlecht* gleich Null⁹⁵) und es lassen sich die Koordinaten x_1, x_2, x_3 eines Punktes der Fläche als rationale Funktionen dreier Parameter u, v, w so darstellen, dass zwischen den beiden ersten Parametern u, v eine algebraische Gleichung $\varphi(u, v) = 0$ besteht⁹⁶). Das Geschlecht dieser Gleichung wird dann als das *Kurvengeschlecht* der Fläche bezeichnet, und wenn dieses Kurvengeschlecht ebenfalls Null ist, so lässt sich an Stelle der beiden algebraischen Parameter u, v ein rationaler Parameter einführen und die Fläche ist rational.

Mannigfaltigkeiten, deren Koordinaten als rationale Funktionen mehrerer Parameter dargestellt werden können, treten mehrfach in der Algebra auf. Insbesondere sind nach *L. Euler* und *A. Cayley* die n^2 Elemente eines quadratischen orthogonalen Systemes als rationale Funktionen von $\frac{1}{2} n(n-1)$ Parametern darstellbar⁹⁷). Ebenso können nach *Frobenius* und *A. Voss*⁹⁸) die Elemente einer Substitution, welche eine bilineare Form von nicht verschwindender Determinante kogredient in sich überführt, im allgemeinen durch rationale Parameter dargestellt werden. Gewisse hierbei auftretende Ausnahmefälle sind von *Frobenius*, *Kronecker*, *A. Loewy*⁹⁹) untersucht worden [I B 2, Nr. 3].

93) J. f. Math. 64 (1865), p. 43; Math. Ann. 1 (1869), p. 253.

94) Gütt. Nachrichten 1869, p. 298; Math. Ann. 2 (1870), p. 293 u. 8 (1875), p. 495.

95) Das Flächengeschlecht kann ebenfalls ganz allgemein als die Anzahl der von einander linear unabhängigen, auf die Fläche bezüglichen Doppelintegrale erster Gattung definiert werden; s. *É. Picard* et *G. Simart*, Théorie des fonctions algébriques de deux variables indépendantes, 1, Paris 1897, p. 191 ff.

96) *Picard* beweist (J. f. Math. 100 [1887], p. 71) den hierher gehörigen Satz: Wenn alle ebenen Schnitte einer algebraischen Fläche Unikursalkurven sind, so ist die Fläche entweder eine unikursale Regelfläche oder eine Steiner'sche Fläche. Über die bez. Untersuchungen italienischer Geometer s. III C 6.

97) *Euler*, Nov. Comm. Petrop. 15 (1770), p. 75; 20, p. 217; *Cayley*, J. f. Math. 32, p. 119 (1846) = Coll. Pap. 1, p. 332; *Baltzer*, Determinantentheorie, 5. Aufl., Leipzig 1881, § 14, 6 [I B 2, Nr. 3].

98) *Frobenius*, J. f. Math. 84, p. 1 (1878) für symmetrische und alternierende, *Voss*, Münch. Abh. II. Kl., 17 (1890) für beliebige Bilinearformen.

99) *Frobenius*, J. f. Math. 84, p. 1 (1878); *Kronecker*, Berl. Sitzungsber. 1890, p. 525. 602. 692. 873. 1063; *Loewy*, Math. Ann. 48, p. 97 (1897).

Ist im Raume von n Dimensionen eine rationale Kurve in der Parameterdarstellung gegeben: $x_1 = \varphi_1(t)$, $x_2 = \varphi_2(t)$, \dots $x_n = \varphi_n(t)$, so hat sich *J. Lüroth* die Frage nach der algebraischen Beziehung gestellt, welche zwischen dem Parameter t und den Koordinaten x_1, \dots, x_n besteht. Es ergibt sich, dass stets eine rationale Funktion von t : $\tau = r(t)$ als rationale Funktion von x_1, \dots, x_n dargestellt werden kann. Ist $\tau = t$ oder eine lineare Funktion von t , so ist die Kurve direkt *umkehrbar* eindeutig auf eine Gerade bezogen; ist τ eine Funktion höheren Grades von t , so kann man x_1, \dots, x_n auch als rationale Funktion von τ darstellen, wodurch der zweite Fall auf den ersten zurückgeführt wird¹⁰⁰).

23. Transformation algebraischer Gebilde. Die in voriger Nr. behandelten Sätze über die rationale Darstellung algebraischer Gebilde behandeln nur ein spezielles Problem der allgemeinen Theorie der Transformation algebraischer Gebilde. Werden die Koordinaten x_1, \dots, x_n eines algebraischen Gebildes einer Transformation $x_1 = \Theta_1(y_1, \dots, y_n), \dots$ $x_n = \Theta_n(y_1, \dots, y_n)$ unterworfen, in welcher $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n$ rationale Funktionen von y_1, \dots, y_n sind, so lassen sich vermöge der zwischen den Koordinaten x_1, \dots, x_n bestehenden Gleichungen im allgemeinen auch y_1, \dots, y_n als rationale Funktionen von x_1, \dots, x_n darstellen, und die beiden Gebilde, deren Punkte die Koordinaten y_1, \dots, y_n und x_1, \dots, x_n besitzen, entsprechen einander umkehrbar eindeutig. Alle algebraischen Gebilde, welche sich in einander umkehrbar eindeutig transformieren lassen, werden in eine *Klasse* gerechnet, und es entsteht die Aufgabe, diejenigen Eigenschaften eines algebraischen Gebildes zu ermitteln, welche jeder umkehrbar eindeutigen Transformation gegenüber invariant sind und also der ganzen Klasse algebraischer Gebilde zukommen.

Das vorstehend dargelegte Prinzip ist im Falle $n = 2$ von *B. Riemann*¹⁰¹) aufgestellt und in umfassender Weise zur Geltung gebracht worden. Das Hilfsmittel der Untersuchung bilden in erster Linie die auf das Gebilde bezüglichen, von einander linear unabhängigen Integrale erster Gattung, deren Anzahl gleich dem Geschlechte p des algebraischen Gebildes ist¹⁰²); die Zahl p ist selbst eine Invariante bei birationaler Transformation. Die Übertragung des Prinzips auf den Fall $n = 3$ (und höheres n) ist Gegenstand der Untersuchung von

100) *Lüroth*, Math. Ann. 9, p. 163 (1875), für $n = 2$; *Weber*, Algebra 2, § 107 für beliebiges n .

101) Theorie der Abel'schen Funktionen § 12 (1857), (*J. f. Math.* 54 = Werke, p. 88).

102) *Noether*, Math. Ann. 17, p. 263 (1880).

Noether, H. Poincaré, Picard¹⁰³) geworden. Die im einzelnen gewonnenen Resultate fallen in das Gebiet der Theorie der algebraischen Funktionen (II B 2) und der Theorie der algebraischen Transformationen und Korrespondenzen (III C 8).

Eine ganz analoge Entwicklung wie die allgemeine Theorie der algebraischen Funktionen hat seit Clebsch (s. o.) die algebraische Geometrie genommen. Die Resultate dieser Theorie stellen für die Algebra in erster Linie das Hilfsmittel der Cremonatransformationen zur Verfügung. Eine ebene Cremonatransformation n^{ter} Ordnung ist eine umkehrbar eindeutige Beziehung zweier Ebenen auf einander, bei welcher den Geraden der einen Ebene eine lineare Schar von ∞^2 rationalen Kurven mit festen Singularitäten entspricht¹⁰⁴). Bei jeder solchen Transformation giebt es, ebenso wie bei den Abbildungen rationaler Flächen auf eine Ebene, „Fundamentalphunkte“, denen in der Bildebene nicht Punkte, sondern Kurven („Fundamentalkurven“) entsprechen. Jede ebene Cremonatransformation n^{ter} Ordnung kann durch eine Folge von Transformationen 2^{ter} Ordnung ersetzt werden¹⁰⁵). Die Cremonatransformationen können auf den Raum übertragen und können in dem Sinne verallgemeinert werden, dass man überhaupt irgend welche Abbildung zweier Flächen (zweier Gebilde) auf einander nach gleicher Methode untersucht¹⁰⁶). Durch derartige algebraische Transformation kann jedes algebraisches Gebilde mit Singularitäten umkehrbar eindeutig auf ein singularitätenfreies Gebilde bezogen werden, wenn man nämlich nötigenfalls die Dimension des linearen Raumes, in welchem das zweite Gebilde gelegen ist, hinreichend gross wählt¹⁰⁷). Die weitere Verfolgung dieser analytisch geometrischen Methoden hat in neuester Zeit bei den italienischen Geometern zu dem Versuche einer allgemeinen Theorie der algebraischen Gebilde zweiter Dimension geführt¹⁰⁸) [III C 5, 9]. Ein Überblick über die für die Algebra hieraus abfliessenden gesicherten Resultate ist zur Zeit noch nicht zugänglich.

103) Noether, die in 94) citierten Abhandlungen. Poincaré, Acta Math. 2, p. 97 (1883) u. 9, p. 321 (1887); Picard et Simart, Fonctions algébriques.

104) L. Cremona, G. di mat. 1, p. 305 (1863) u. 3, p. 269 (1865), od. Bol. Mem. (2), 2 u. 5.

105) Noether, Math. Ann. 3, p. 167 (1870); Cayley, Lond. Math. Soc. Pr. 3, p. 161 (1870) = Coll. Pap. 7, p. 253; J. Rosanes, J. f. M. 73, p. 97 (1870).

106) Noether, Math. Ann. 2, p. 293 (1870); 3, p. 547 (1871); Ann. di mat. (2) 5, p. 163 (1872); Cremona, Ann. di mat. (2) 5, p. 131 (1871); Lomb. Istit. R. (2) 4, p. 269, 315 (1871).

107) Picard et Simart, Fonctions algébriques, chap. 4, 1.

108) Eine Übersicht über den gegenwärtigen Stand der Untersuchung und die bisherige Litteratur giebt die Abhandlung von F. Enriques und G. Castelnuovo, Math. Ann. 48, p. 241 (1897); vgl. Enriques, Zürich Congr. Verh. 1898, p. 145.

IB2. INVARIANTENTHEORIE

VON

W. FR. MEYER

IN KÖNIGSBERG I./PR.

Inhaltsübersicht.

1. Keime der Theorie.
2. Entwicklung des Invariantenbegriffes.

I. Äquivalenz.

3. Äquivalenz von quadratischen und bilinearen Formen und Formen
4. Äquivalenz von Formen höherer als der zweiten Ordnung.
5. Automorphe Formen. Invarianten endlicher Gruppen.

II. Formenverwandtschaft.

6. Endlichkeit.
7. Associierte Formen und typische Darstellung.
8. Syzygien.
9. Abzählende Richtung.
10. Kanonisierung.
11. Umkehrfragen. Irrationale Formen.

III. Invariante Prozesse.

12. Symbolik und graphische Darstellung.
13. *Aronhold's* Prozess. Polaren.
14. Überschiebungs- und Ω -Prozess. Normierung einer linearen Differentialgleichung.
15. Substitution einseitiger Ableitungen.
16. Substitution homogener Ableitungen.
17. Reihenentwicklungen.
18. Differentialgleichungen der Komitanten.

IV. Erweiterungen.

19. Höhere Transformationen.
20. Reziprokanten und Differentialinvarianten.
21. Projektive Invarianten der Krümmungstheorie.
22. Differentialformen und Differentialparameter der Flächentheorie.

V. Besondere Gruppen und Formen.

23. Seminvarianten.
24. Kombinanten und Apolarität.

25. Resultanten und Diskriminanten.
26. Realitätsfragen.
27. Weitere spezielle Formen und Gruppen.

Monographien.

- J. J. Sylvester*, On the Principles of the Calculus of Forms. Cambr. Dubl. math. J. 7 (1852), p. 52, 179; 8 (1853), p. 62, 256; 9 (1854), p. 85. Dazu als Einleitung ib. 6 (1851), p. 186, 289.
- A. Cayley*, Memoirs upon Quantics, Lond. Tr.: I, 144 (1854), p. 244; II, III, 146, (1856), p. 101, 627; IV, V, 148 (1858), p. 415, 429; VI, 149 (1859), p. 61; VII, 151 (1861), p. 277; VIII, 157 (1867), p. 513; IX, 161 (1871), p. 17; X 169 (1878), p. 603. Abgedruckt (mit Zusätzen des Verf.) in Coll. Papers 2: I, p. 221; II, p. 250; III, p. 310; IV, p. 513; V, p. 527; VI, p. 561; 4: VII, p. 325; 6: VIII, p. 147; 7: IX, p. 334; 10: X, p. 339. Dazu die numerischen Tafeln zu II in Pap. 2 (1889), p. 276, und die Tafeln für Formen der f_5 ib. p. 282.
- G. Salmon*, Lessons introductory to the modern higher algebra, Dublin 1. ed. 1859, 4. ed. 1885 (hauptsächlich binäre Formen; citiert unter „Salmon“). Deutsch bearb. von *W. Fiedler*: Vorlesungen über die Algebra der linearen Transformationen, Leipzig, 1. Aufl. 1863; 2. Aufl. 1877 („Salmon-Fiedler“).
- F. Brioschi*, Teorica dei Covarianti, Roma 1861 (Binäre Formen).
- W. Fiedler*, Die Elemente der neueren Geometrie und der Algebra der binären Formen, Leipzig 1862.
- G. Battaglini*, Gi. di mat. 9 (1871), p. 1, 76; 14 (1876), p. 54 (Binäre Formen). Ib. 8 (1870), p. 38, 129; 10 (1872), p. 152, 193 (Ternäre Formen); ib. 21 (1883), p. 50, 293; 25 (1887), p. 281 (Bilineare Formen).
- A. Clebsch*, Theorie der binären algebraischen Formen, Leipzig 1872 („Clebsch“).
- Faà di Bruno*, Théorie des formes binaires, Turin 1876. Deutsch bearb. von *Th. Walter* mit Unterst. von *M. Noether*, Einleitung in die Theorie der binären Formen, Leipzig 1881 („Bruno“).
- P. Gordan*, Über das Formensystem der binären Formen, Univ.-Progr. Erlangen, Leipzig 1875 („Programm“). Vorlesungen über Invariantentheorie, herausg. von *G. Kerschensteiner*, 1. Determinanten, 2. Binäre Formen, Leipzig 1885, 1887 („Gordan“).
- A. Capelli*, Fondamenti di una teoria generale delle forme algebriche, Rom. Linc Mem. 12 (1882), p. 1.
- G. Rubini*, Teorica delle forme in generale, specialmente delle binarie. I. Esposizione dell' algoritmo fondamentale di questa teoria, Lecce 1886.
- E. Study*, Methoden zur Theorie der ternären Formen, Leipzig 1889 („Study“).
- J. Deruyts*, Essai d'une théorie générale des formes algébriques, Bruxelles 1891 (Seminvarianten) („Deruyts“).
- W. Fr. Meyer*, Bericht über die Fortschritte der proj. Invariantentheorie, deutsche Math.-Vereinigg., 1, 1892 („Inv. Ber.“); französ. Ausgabe von *H. Fehr*, Paris 1897; ital. Ausgabe von *G. Vivanti*, Napoli 1899.
- E. B. Elliott*, An Introduction to the algebra of Quantics, Oxford 1895 („Elliott“).
- P. Muth*, Grundlagen für die geom. Anwendung der Invariantenth., Leipzig 1895.
- Theorie der Elementarteiler, Leipzig 1899 („Muth“). (Äquivalenz der bilinearen und quadratischen Formen).

H. Andoyer, Théorie des Formes, Paris 1898.

Vgl. noch die einschlägigen Kap. in *A. Clebsch* u. *F. Lindemann*, Vorlesungen über Geometrie 1, Leipzig 1875/76, franz. v. *A. Benoist*, Paris 1879/83; 2¹, Leipzig 1891; *W. S. Burnside* u. *A. W. Panton*, Theory of Equations, 3. ed., Dublin 1892, New-York 1893; *H. Weber*, Höhere Algebra, Braunschweig 1895/96 1, 2; 1, 2. Aufl. 1898 („Weber“); franz. v. *J. Gries*, Paris 1898; *A. Capelli*, Algebra complementare, 2. ed., Napoli 1898.

Bezeichnungen.

Eine binäre Form n^{ter} Ordnung wird mit f_n, g_n, \dots bezeichnet, eine ternäre mit C_n , eine quaternäre und höhere mit F_n ; die dualistischen Formen entspr. mit griechischen Buchstaben. Sind x_1, x_2, \dots, x_m die Variablen, α die Koeffizienten, so ist die genauere Bezeichnung $F_n = F_n(x_1, \dots, x_m | \alpha) = F_n(x | \alpha)$, dualistisch $\Phi_n(u | \alpha)$. Analog bei mehreren Variablenreihen; so z. B. ist $F_{11} = F_{11}(x; y | \alpha)$ eine bilineare Form. Das Wort „Ordnung“ bezieht sich stets auf die Variablen, „Grad“ auf die Koeffizienten. Die i^{te} Überschiebung (Nr. 14) von f über g hat das Zeichen $(f, g)_i$, entspr. allgemein von $F(x)$ über $\Phi(u) : (F, \Phi)_i$; eine lineare Substitution hat das Zeichen S .

1. Keime der Theorie. *J. Lagrange*¹⁾ konstatiert, aus Anlass der Darstellung einer ganzen Zahl (I B 2) durch eine quadratische Form $f_2(x, y) = a_0 x^2 + 2a_1 xy + a_2 y^2$, dass sich die „Diskriminante“²⁾ („Determinante“³⁾) $a_0 a_2 - a_1^2$ von f_2 beim Übergange von x zu $x + \lambda y$ nicht ändert. — Bei *K. F. Gauss*³⁾ bildet bereits die allgemeine lineare „Substitution“ („Transformation“) S der homogenen Variablen die Grundlage für die Zahlentheorie der f_2 und C_2 , deren Diskriminanten (Nr. 25) als „Invarianten“⁴⁾ nachgewiesen werden, d. i. als Ausdrücke in den Koeffizienten der f_2 resp. C_2 , die sich nach Ausübung von S nur um eine (die zweite) Potenz der Substitutionsdeterminante (I B 1 b, Nr. 12) oder des „Moduls“⁵⁾ Δ ändern.

1) Berl. Mém. 1773, p. 265 bes. p. 268 = Oeuvr. 3, p. 699, 701.

2) Der Ausdruck von *J. J. Sylvester*, Cambr. Dubl. m. J. 7 (1852), p. 52.

3) Disquis. arithmeticae, Braunschweig, 1801 = Werke 1; deutsch von *H. Maser*, Berlin 1889; frz. v. *A. C. M. Pouillet-Delisle*, Par. 1807. *G.* nennt eine ganze, rationale, homogene Funktion von 2, 3, ... Variablen eine „binäre, ternäre, ... Form“, art. 266. Die Determinante der f_2 : art. 157, der C_2 : art. 267. Zwei Formen, die durch (ganzzahlige) S wechselseitig in einander überführbar sind, heißen „äquivalent“: art. 157, 270. Als einfachste weitere Invarianten treten auf bei *G. Boole*, Cambr. math. J. 3 (1841), p. 7 die Diskr. der f_3 ; bei *G. Eisenstein* die quadratische Invariante i und die kubische j der f_4 : J. f. Math. 27 (1844), p. 81; die Ausdrücke (ohne Erkenntnis der Invarianz) schon bei *A. Cauchy*, J. Éc. pol. 16 (1815), p. 457.

4) Der Ausdruck von *J. J. Sylvester*, Cambr. Dubl. m. J. 6 (1851), p. 290.

5) Der Ausdruck von *J. J. Sylvester*, Cambr. Dubl. m. J. 6 (1851), p. 188; für $\Delta = 1$ heisst die S „unimodular“, ib. 7 (1852), p. 52.

Der von *A. Cauchy*⁶⁾ und *J. Binet*⁶⁾ allgemein bewiesene Satz über die Multiplikation zweier Determinanten (I A 2, Nr. 21) sagt aus, dass sich eine Determinante „invariant verhält“, d. h. sich nur um eine (die erste) Potenz von Δ ändert, wenn die Elemente je einer Reihe (oder Kolonne) der nämlichen S unterworfen werden.

Andere Keime unserer Theorie finden sich in den Entwicklungen⁷⁾ französischer und englischer Mathematiker und Physiker über orthogonale (Nr. 3) Transformation der F_2 in Aggregate von Quadraten. Ferner in der durch *V. Poncelet* und *J. D. Gergonne* ins Leben gerufenen, durch *M. Chasles*, *F. Möbius*, *J. Plücker*, *J. Steiner* und *Ch. v. Staudt* weiter ausgebildeten projektiven Geometrie⁸⁾; das Doppelverhältnis und die Polarreziprozität lehrten, dass gewisse Ausdrücke resp. gewisse Eigenschaften von Figuren bei linearen Transformationen der Koordinaten erhalten bleiben.

2. **Entwicklung des Invariantenbegriffes.** *G. Boole*⁹⁾ wies nach, dass die Diskriminante D einer Urform $F_n(x|a)$ eine „Invariante“ $J = J(F)$ von F ist, d. h. wenn vermöge einer S vom Modul Δ sich

6) *Cauchy* in *J. Éc. pol.* 9, cah. 16 (1815) (lu Nov. 1812), p. 286; *Binet*, ib. 10 (1815), cah. 17 (lu Nov. 1812), p. 29 bes. p. 81, 107. Eine unmittelbare Anwendung des Satzes ist die Multipl. zweier Funktionaldeterminanten (vgl. I B 1 b, Nr. 21) bei *C. G. J. Jacobi*, *J. f. Math.* 22 (1841), p. 319 = Werke 3, p. 393, deutsch von *P. Stäckel*, Ostwalds Klassiker, Leipzig, Nr. 78. Die Funktionaldet. erscheint invariant gegenüber beliebigen Transformationen der Variabeln [Anm. 271, 369 a]. Wegen der Anwendung auf die Transf. vielfacher Integrale s. II A 2, Nr. 41, Anm. 253.

7) Vgl. die Litteraturangaben in *R. Baltzer's* Determinanten, 5. Aufl., Leipzig 1881; auch bei *G. Boole*, *Cambr. Math. J.* 1 (1843), p. 1.

8) Vgl. *A. Clebsch*, *Gött. Abh.* 15 (1872), p. 1 = *J. Plücker's* Ges. Math. Abh. 1, Leipzig 1875, p. 1; sowie bes. *E. Kötter*, Bericht über die Entw. der synth. Geom., Deutsche Math.-Vereinig. 5² (1898), p. 1; *A. Schönflies* in *J. Plücker's* Math. Abh. (Anhang). Wegen anderer Vorstufen der Theorie vgl. *P. Gordan*, *Math. Ann.* 7 (1873), p. 38; sowie, auch bez. des indirekten Eingreifens von *E. Galois* und *H. Grassmann* „Inv. Ber.“ p. 81, 84. — Über die symbol. Bezeichnung bei der Taylor'schen Reihe s. II A 2, Nr. 12.

9) *Cambr. math. J.* 3 (1841) (dat. 28. April), p. 1. *B.* studiert die Äquivalenz zweier Formenpaare $F_n, G_n; F'_n, G'_n$; die Gleichungen $D(F + \lambda G) = 0$, $D(F' + \lambda G') = 0$ müssen dann übereinstimmen. Im Falle von Paaren ungleicher Ordnung reduziert *B.* in *Cambr. math. J.* 3 (1841), p. 106 die Aufgabe durch totale Differentiation (vgl. noch ib. 2 [1841], p. 61) auf die Äquiv. von Differentialformen gleicher Ordnung.

10) *w* wird von *B.* auf Grund eines Satzes von *Sylvester* genauer bestimmt, *Cambr. math. J.* 4 (1844), p. 167, als $n(n-1)^{m-1}$, wenn m die Anzahl der Variabeln. *w* heisst nach *Cayley*, II. Mem., das „Gewicht“ der Invariante

$F(x|a)$ ändert in $F'(x'|a')$, so ist $J(a') = \Delta^w J(a)$, wo w^{10} eine gewisse natürliche Zahl ist. $B.$ bedient sich des „Aronhold'schen Prozesses“¹¹⁾ $\sum b_i \frac{\partial J}{\partial a_i}$ (Nr. 13), um aus J eine Simultaninvariante von $F_n(x|a)$, $G_n(x|b)$ herzuleiten. Es lässt sich¹²⁾ die Definition einer (in den a, b, \dots ganz-rationalen) Invariante dahin einschränken, dass sie sich nach Ausübung von S um einen Faktor ändert, der nur von den S -Koeffizienten σ abhängen soll.

$G. Boole$ ¹³⁾, $G. Eisenstein$ ¹³⁾ und $O. Hesse$ ¹⁴⁾ zogen schon „Kovarianten“ C von $F_n(x|a)$ in Betracht, d. s. Formen der x und der a , die der Forderung $C(x'|a') = \Delta^w C(x|a)$ genügen, $Gauss$ ¹⁵⁾ schon analoge „Kontravarianten“ $\Gamma(u|a)$, die statt der x die u (s. unten) enthalten, zu denen u. a. $Ch. Hermite$ 's¹⁶⁾ „adjungierte Formen“ (Nr. 12, 13, 18) gehören. — $A. Cayley$ ¹⁷⁾ giebt Prozesse an, um beliebig viele

(Nr. 9, 18, 23). J heisst gerade resp. ungerade (schief), je nachdem w gerade oder ungerade ist.

11) J. f. Math. 62 (1863), p. 281.

12) $A. Clebsch$, Bin. Formen, p. 306; $P. Gram$, Math. Ann. 7 (1874), p. 234; $E. d'Ovidio$, Gi. d. mat. 15 (1877), p. 187; $A. Capelli$, Rom. Linc. Mem. 1882, p. 582; $O. Hölder$, Böklen Mitt. 1 (1884), p. 59; $E. B. Elliott$, Mess. 16 (1885), p. 5; $P. Mansion$, ib. p. 127: „Study“ p. 32; „Deruyts“ p. 49; $Kronecker$, Berl. Ber. (1889), p. 609. — Dass für gewisse Untergruppen von S die Definition des Textes zu eng ist, betont wohl zuerst $Klein$ im „Erlanger Programm“ (1872); man vgl. die Ausführungen von $Study$ für die „Inversionsgruppe“ Math. Ann. 49 (1897), p. 497 [Nr. 23, 27].

13) Die quadratische Kov. H der f_3 bei $G. Boole$, Cambr. math. J. 3 (1842), p. 115; bei $G. Eisenstein$, J. f. Math. 27 (1844), p. 75, 89. $Boole$ betrachtet auch schon (l. c.) (binäre) Polaren (Nr. 13) und simultane Kovarianten.

14) $H.$ studiert die nach ihm benannte Determ. der zweiten Ableitungen einer C_n und deckt ihre Rolle in der geom. Theorie der C_n , bes. der C_3 , auf: J. f. Math. 28 (1844), p. 68 = Werke, p. 123 [I B 1 b, Nr. 22]. Bez. der Leistungen von $H.$ vgl. $M. Noether$, Zeitschr. Math. Phys. 20 (1875), p. 77; $Klein$, Progr. Münch. Polyt. 1875; $G. Bauer$, Münch. Abh. 1882.

15) In den Disquis. arithm. artt. 267, 268 (vgl. Anm. 1) zeigt $G.$, dass sich die „Adjungierte“ einer C_2 (d. i. ihr dualistisches Äquivalent) bei der „transponierten“ S invariant verhält. Vgl. $P. Bachmann$, Arithmetik der quadratischen Formen, 1, Leipzig 1898, Abschn. 2, Kap. 5.

16) J. f. Math. 40 (1850), p. 272, 292; s. Anm. 18.

17) Cambr. math. J. 4 (1845), p. 193 = Coll. Pap. 1, p. 80. Ist F'_n multi-linear (vgl. $Sylvester$, Cambr. Dubl. math. J. 7 [1852], p. 93), so werden vermöge einer Subst. S_i ($i = 1, 2, \dots, n$) einer Variablenreihe die Koeff. von F'_n nur linear geändert, sodass man auf Grund des Determ.-Mult.-Satzes sofort Bildungen (darunter „Höhere Determinanten“ [I A 2, Nr. 32], vgl. $Sylvester$, Cambr. Dubl. math. J. 7 [1852], sect. 3, p. 75) angeben kann, die sich gegenüber S_i weiterhin aber auch solche, die sich geg. allen S invariant verhalten. Speziell hat jede f_{2n} eine quadratische Invariante. In Cambr. Dubl. math. J. 1 (1846), p. 104 = Coll. Pap. 1,

Invarianten J („Hyperdeterminanten“, Nr. 12) von $F_n(x|a)$ zu bilden, und erweitert den Begriff von J auf multilineare („ n -partite“) Urformen F_n , die linear sind in n Variablenreihen, die auch verschiedenen („unabhängigen“) S unterworfen werden. — *Sylvester* ordnet die Begriffe systematisch. Er beschränkt sich, was oft zweckmässig ist, auf „unimodulare“ S i. e. vom Modul $\Delta = 1$. Die „universale“ Form $u_x = u_1 x_1 + \dots + u_n x_n$ ändert sich nicht¹⁸⁾, wenn man die Variablen x einer S , und zugleich die „kontragredienten“¹⁹⁾ Variablen u der „inversen“ („reziproken“) Substitution unterwirft. „Kogredient“¹⁹⁾ heissen Variablenreihen, die der nämlichen S unterliegen.

Die Kovarianten, Kontravarianten und Zwischenformen²⁰⁾ (die die x und u zugleich enthalten) lassen sich²¹⁾ als Simultaninvarianten auffassen, wenn man den Urformen eine, oder mehrere Formen vom Typus u_x hinzufügt. Alle invarianten Bildungen umfasst *Sylvester* als „Konkomitanten“^{22a)}, (wir sagen mit *K. Reuschle*^{22b)} „Komitanten“); er giebt eine Reihe von Prozessen an (Nr. 16), wie man aus Bildungen des einen Typus solche eines andern erzeugt. Allgemein ist eine Komi-

p. 95 wird zur Erzeugung von inv. Bildungen der Prozess $\Omega = \left| \frac{\partial}{\partial x_i^{(k)}} \right|$ ($i, k = 1, 2, \dots, n$)

eingeführt (wo nach Ausmultiplikation je die bez. n^{te} , bei Ω^l die l^{te} Ableitung zu substituieren ist); die Funktionaldet. von n Funktionen $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$ der x_1, x_2, \dots, x_n entsteht, wenn das Produkt $f_1(x^{(1)}) \cdot f_2(x^{(2)}) \cdot \dots \cdot f_n(x^{(n)})$ dem Prozesse Ω unterworfen wird. Hinterher kann man die Variablenreihen wieder gleichsetzen. So liefert für $f_2(x) = a_0 x_1^2 + 2a_1 x_1 x_2 + a_2 x_2^2$, $g_2(x) = b_0 x_1^2 + 2b_1 x_1 x_2 + b_2 x_2^2$ $\Omega^2 f_2(x) g_2(x)$ die Inv. $a_0 b_2 - 2a_1 b_1 + a_2 b_0$ resp. $2(a_0 a_2 - a_1^2)$. Bez. der Leistungen *Cayley's* vgl. *M. Noether*, Math. Ann. 46 (1895), p. 462; *A. R. Forsyth* in *Cayley's* Pap. 8 (1895), p. IX = Lond. Roy. Pr. 58 (1895).

18) Cambr. Dubl. math. J. 7 (1852), p. 56. Ist also F_n eine Urform (oder die Kovariante einer solchen), J eine Invariante von F , so ist $J(F + \lambda u_x^n)$ für jeden Wert von λ eine Kontravariante von F . Der Faktor von λ heisst die erste „Evektante“ (ib. p. 57) von J [Nr. 18]; der erzeugende Prozess hat z. B. für eine $C_3 = a_{111} x_1^3 + 3a_{112} x_1^2 x_2 + \dots$ die Gestalt: $u_1^3 \frac{\partial}{\partial a_{111}} + 3u_1^2 u_2 \frac{\partial}{\partial a_{112}} + \dots$. Ist J die Diskriminante von F , so entstehen die „adjungierten Formen“ von *Hermite* (vgl. Anm. 16), z. B. aus f_3 die kubische Kovariante.

19) Der Ausdruck ib. 7 (1852), p. 53.

20) Der Ausdruck von *S. Aronhold*, J. f. Math. 62 (1863), p. 281.

21) Cambr. Dubl. Math. J. 8 (1853) p. 64, 259. Bez. der Leistungen *Sylvester's* vgl. *M. Noether*, Math. Ann. 50 (1898), p. 133. Die Auffassung von *Sylv.* bringt für besondere Gruppen auch Nachteile mit sich: *H. Burkhardt*, Math. Ann. 43 (1893), p. 199.

22a) Der Ausdruck eingeführt ib. 6 (1851), p. 290. b) Zürich Kongr. Verh. 1898, p. 123.

tante einer Komitante wieder eine solche²³⁾. *Sylv.* charakterisiert auch den Typus der „Kombinanten“²⁴⁾ (Nr. 24), d. s. Formen, die in Bezug auf zwei Reihen von m resp. n Variabeln zugleich invariant sind.

Bei *Cayley* erscheinen²⁵⁾ die J resp. C als ganz-rationale Lösungen ihrer Differentialgleichungen (Nr. 18).

*S. Aronhold*²⁶⁾ erschliesst aus den Differentialgleichungen (Nr. 18) die Existenz gewisser Brüche φ als der „absoluten Invarianten“, die sich bei einer S vom Modul Δ gar nicht ändern, denen die früheren, die Zähler und Nenner der φ , als „relative“ gegenüberstehen.

Bei *A. Clebsch*²⁷⁾ erscheinen die J als Aggregate symbolischer Produkte (Nr. 12). *Clebsch* erweitert den Begriff von J , indem er die „Zwischenvariablen“²⁸⁾ (Nr. 12) einführt, die den linearen Stufen des n -ären Gebietes entsprechen.

*P. Gordan*²⁹⁾ und *A. Capelli*³⁰⁾ ziehen, wie schon *Cayley* für multilineare Urformen, unabhängige S mehrerer Variablenreihen in Betracht.

„Irrationale“ Invarianten, d. s. Wurzeln irreducibler Gleichungen [I B 1 b, Nr. 5] mit rationalen J als Koeffizienten, drängen sich auf, wenn sich Urformen in irrational-kanonischer Gestalt (Nr. 11) darbieten, wenn also der „Rationalitätsbereich“ (I B 1 a, Nr. 9) der Koeffizienten passend erweitert wird.

*E. Study*³¹⁾ hat die Stufen des Invariantenbegriffes in Parallele gesetzt zu *L. Kronecker's*³²⁾ arithmetischer Begründung der Arten algebraischer Grössen. Bei *S. Lie*³³⁾ (II A 6 und Nr. 12) liegt eine allgemeine Auffassung anderer Art vor. Unterwirft man die Variablenreihen

23) *Cambr. Dubl. math. J.* 6 (1851), p. 291; 7 (1852), p. 57.

24) *ib.* 8 (1853), p. 256; 9 (1854), p. 85. *S.* betrachtet auch Kombinanten von Formen ungleicher Ordnung, die später von *H. S. White* genauer untersuchten „Semikombinanten“, *Am. J.* 17 (1895), p. 235 [Nr. 24].

25) *I. u. II. Mem.* = Pap. 2, p. 221, 250.

26) *J. f. Math.* 62 (1863), p. 281.

27) *J. f. Math.* 59 (1860), p. 1. Bez. der invariantentheor. Leistungen von *Clebsch*, bes. auch der geometrischen Anwendungen vgl. *Gordan* in *Math. Ann.* 7 (1874), p. 37.

28) *Gött. Abh.* 17 (1872), p. 1.

29) *Math. Ann.* 13 (1878), p. 379 (bei Auflösung der $f_5 = 0$); bei *H. Klein* u. *R. Fricke*, *Modulfunktionen* 2, Leipzig 1892, p. 127 finden sich Anwendungen zur Aufstellung von Modulargleichungen, *ib.* p. 690 von Modularkorrespondenzen [II B 4 a; c].

30) *Gi. di mat.* 17 (1879), p. 69 ($f_2(x|y)$ s. Anm. 218, 237). — *C. le Paige* behandelt die multilinearen Formen bei unabh. S systematisch, s. Anm. 195 und bez. der Seminvarianten [Nr. 23] *Belg. Bull.* (3) 2 (1881), p. 40.

31) *Leipz. Ber.* 1886, p. 137; „Study“ p. 1.

32) *Festschrift*, Berlin 1881 = *J. f. Math.* 92, p. 1.

33) „Vorl. über endl. kont. Transf.gruppen“, v. *S. Lie* und *F. Engel*, Leipzig

$(x), (y), \dots$ von Urformen $F^{(i)}(x; y; \dots | a^{(i)})$ einer gewissen „Gruppe“ G von S , so induzieren die S eine holoedrisch isomorphe Gruppe G' von S' der $a^{(i)}$: der Zusammenhang zwischen G und G' stellt sich symbolisch am einfachsten dar (Nr. 12). Eine analytische und in den $a^{(i)}$ je homogene Funktion, die G' gegenüber unveränderlich ist, ist eine „absolute“ Invariante der F . Ist G die allgemeine projektive Gruppe, und sind auch die a allgemein, so sind die rationalen absoluten J von G' die *Aronhold'schen* Brüche φ . Die relativen J erscheinen als absolute, wenn man G durch die Untergruppe vom Modul 1 ersetzt.

*E. B. Christoffel*³⁴⁾ und *L. Maurer*³⁵⁾ haben Gruppen G von rationalen Substitutionen berücksichtigt, während die G' projektiv bleiben; die charakteristische Gestalt der Differentialgleichungen für die J bleibt erhalten. Die „Seminvarianten“ (Nr. 23) i. e. „Leitglieder“³⁶⁾ der Komitanten sind Invarianten einer gewissen Untergruppe von G' .

Unter den ganz-rationalen Invarianten gegebener Urformen ragen hervor die „Grundformen“ (Nr. 6) und die „assozierten Formen“ (Nr. 7), aus denen sich alle übrigen ganz-rational resp. rational ableiten lassen.

3. Äquivalenz von quadratischen und bilinearen Formen und Formenscharen. Als Ausgang dient das wegen seiner Anwendungen auf Mechanik und Geometrie vielfach behandelte Problem, eine (allgemeine) $F_2(x_1, \dots, x_n) = \sum a_{ik} x_i x_k = a_x^2$ ($|a_{ik}| = D(F) \neq 0$) durch eine S der x auf eine Summe (Aggregat) von (n) Quadraten

$$y_1^2 + \dots + y_k^2 - y_{k+1}^2 - \dots - y_n^2$$

zu bringen³⁷⁾. Für ein und dieselbe F_2 ist nach *Sylvester* die Anzahl

1893; eingehender: „Vorl. über endl. kont. Transf.gruppen mit geom. Anwendungen“, v. *S. Lie* und *G. Scheffers*, Leipzig 1893, Kap. 23.

34) *Math. Ann.* 19 (1881), p. 280.

35) *Münch. Ber.* 1888, p. 103; *J. f. Math.* 107 (1890), p. 89; *Münch. Ber.* 1894, p. 297.

36) *Cayley*, *I. Mem.* = Pap. 2, p. 221.

37) *J. L. Lagrange*, *Misc. Taur.* 1 (1759), p. 18 = *Oeuvr.* 1, p. 3 bes. p. 7 [$F_2(dx_1, dx_2, dx_3)$]; *Mécan. anal.*, Paris 1788 (deutsch v. *H. Servus*, Berlin 1887). 1, III [II A 2, Nr. 18, Anm. 126]. *K. F. Gauss*, *Disq. ar. art.* 271; *Comm. Gott.* 5, § 31 = *Werke* 4, p. 29 bes. p. 37; *Theoria motus*, Hamburg 1801. *G. Boole*, *Cambr. math. J.* 2 (1840), p. 64. *J. Plücker*, *J. f. Math.* 24 (1842), p. 283 = *Ges. Abh.* 1, p. 399. *O. Hesse*, *J. f. Math.* 57 (1860), p. 175 = *Werke* p. 489; *Hesse*, *Anal. Raumgeom.*, Leipzig 1861, 1869, 1876 (3. Aufl. mit Zusätzen von *S. Gundelfinger*). Bes. eingehend bei *S. Gundelfinger* (nach *Plücker*) *J. f. Math.* 91 (1881), p. 221. Die kanonischen Koeff. in Det.form bei *J. Studnička*, *Prag. Ber.* 1888, p. 256. Kriterien der Darstellbarkeit von F als Summe von $m (< n)$ Quadraten: *Benoit*, *Par. C. R.* 101 (1885), p. 889; *Nouv. Ann.* (3) 5 (1886), p. 30; *de Presle*, *Par. Soc. math. Bull.*

k konstant („Trägheitsgesetz“³⁸) der F_2^4). Insbesondere hat man eine Quadratsumme $x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2$ durch „orthogonale“³⁹) S in sich („automorph“⁴⁰) transformiert.

*Cayley*⁴¹) stellt die Koeffizienten einer (eigentlichen) orthogonalen S rational durch $\frac{n(n-1)}{2}$ unabhängige Parameter λ_{ik} , die Elemente einer „halb- oder schiefsymmetrischen“ Determinante ($\lambda_{ik} + \lambda_{ki} = 0$) dar (I A 2, Nr. 28). *Ch. Hermite* erweitert das Verfahren auf die automorphe Transformation einer allgemeinen C_2 ,⁴²) sodann einer allge-

14 (1886), p. 98. *D. André*, ib. 15 (1887), p. 188. *J. Valyi*, Arch. f. Math. (2) 6 (1888), p. 445. Im übrigen vgl. *R. Baltzer*, Determinanten, 5. Aufl., Leipzig 1881, sowie I C 2. — Für $k = 0$ (oder n) heisst nach *Gauss* (l. c.) die F_2 definit, sonst indefinit (Kriterium: II A 2, Nr. 23). — Wegen der arithmetischen Äquivalenzmethoden sei bez. der ganzen Nr. auf I C 2, auf *P. Bachmann*, Die Arithmetik der quadratischen Formen, 1, Leipzig 1898, sowie auf „Muth“ verwiesen.

38) *J. J. Sylvester*, Phil. Mag. (4) 4 (1852), bes. p. 140; Lond. Tr. 143 (1853) bes. p. 481, 484. Nach *C. W. Borchardt* (J. f. Math. 53 [1857], p. 281) schon 1847 im Besitze von *K. G. J. Jacobi* vgl. *J.* (Nachlass) ib. p. 275 = Werke 3, p. 591; *Ch. Hermite*, ib. p. 271; *Brioschi*, Nouv. Ann. 15 (1856), p. 264; *de Presle*, Par. Soc. math. Bull. 15 (1857), p. 179. Geom. Deutung u. arithm. Beweis bei *E. Netto*, J. f. Math. 110 (1892), p. 184. — Auf Grund des Gesetzes haben *Hermite*, Par. C. R. 1853, p. 294; J. f. Math. 52 (1856), p. 39 bes. p. 43, *Jacobi* (l. c.) und *Sylvester*, Lond. Trans. 143 (1853), p. 407 bes. p. 484 mittels der „Bezoutiante“ (I B 3 a, Nr. 8) die Zahl der reellen Wurzeln einer algebr. Gleichung zwischen geg. Grenzen ermittelt. Vgl. noch *K. Hattendorff*, Die Sturm'schen Funktionen, Gött. 1862; *L. Kronecker*, Berl. Ber. 1873, p. 117 = Werke 1, p. 303; *Weber* 1, Abschn. 5, 6, 7, und bes. die historische Darstellung bei *M. Noether*, Math. Ann. 50 (1898), p. 139. — Wes. mit Hilfe des Trägheitsgesetzes hat *K. Hensel* die $F_2(x_1, x_2, \dots, x_n = 1)$ in reelle Typen eingeteilt, J. f. Math. 113 (1894), p. 113.

39) *L. Euler*, Petr. Nov. Comm. 15 (1770) = (Comm. Arithm. Coll. 1, p. 427), bes. p. 75, 101 ($n = 3$, ohne Beweis für $n = 4$); *A. Cauchy*, Exerc. de math. Paris 1829, bes. p. 140; *Jacobi*, J. f. Math. 12 (1834), p. 7 = Werke 3, p. 199, Werke (Nachlass) 3, p. 599; *O. Hesse* ($n = 4$), J. f. Math. 45 (1853), p. 93 = Werke, p. 307; ib. 99, p. 110 (Nachlass) = Werke p. 663. Vgl. weiter Anm. 41 und I B 1 c, Nr. 22. Der Fall $k > 0$ kommt auf $k = 0$ zurück.

40) Der Ausdruck von *A. Cayley*, Lond. Tr. 148 (1858), p. 39 = Papers 2, p. 497.

41) J. f. Math. 32 (1846), p. 119 = Papers 1, p. 332. Für $n = 3$ schon im wes. bei *Euler* (Anm. 39), bei *O. Rodrigues*, J. de math. 5 (1840), p. 380 bes. p. 405. *C.*'s Darstellung versagt, wenn — 1 eine Wurzel der char. Gleichung ist; vgl. die Ergänzungen bei *J. Rosanes*, J. f. Math. 80 (1875), p. 52; *G. Frobenius*, ib. 84 (1878), p. 1 (Grenzprozess); *L. Kronecker*, Berl. Ber. 1890, p. 525, 602, 691, 873, 1063, 1375; 1891, p. 9, 33; *H. Taber*, Chic. Congr. 1896, p. 395, s. noch Anm. 70. Das Analoge gilt von Anm. 42, 43.

42) J. f. Math. 47 (1853), p. 307. Eine Weiterführung und Ergänzung bei *P. Bachmann*, Math. 75 (1899), p. 287.

meinen F_2 ,⁴³⁾ durch Vermittelung der $\frac{x_i + y_i}{2}$, wenn $F_2(x) \equiv F_2(y)$.

A. Cayley⁴⁴⁾ stellt Hermite's Ergebnis in „Matrices“⁴⁵⁾-Gestalt dar; die fragliche S ist $D^{-1}(D - Y)(D + Y)^{-1}D$, wenn D die Matrix der a_{ik} , Y eine willkürliche schiefsymmetrische Matrix ist. Cayley⁴⁶⁾ überträgt auch schon das Ergebnis auf eine allgemeine $F_{1,1}(x_1 \dots x_n; y_1 \dots y_n | a_{ik})$ bei unabhängigen S der x und y , und charakterisiert die Stellung der symmetrischen ($a_{ik} = a_{ki}$) und alternierenden ($a_{ik} = -a_{ki}$) $F_{1,1}$.

Die Transformation der ϑ -Funktionen (II B 7) führte auf die Aufgabe, eine $F_{1,1}$ auf die „normale“ Gestalt einer gewissen Summe von Produkten zu bringen. Falls $D(F) = |a_{ik}| \neq 0$, zeigt L. Kronecker⁴⁷⁾ mittels der „beigeordneten“ Form, dass die Lösung einer „Resolvente“ n . Ordnung (I B 3 c, d, Nr. 10) ausreicht, und erledigt damit auch die „automorphe“ Transformation von F für identische („kongruente“) S der x und y . L. Christoffel⁴⁸⁾ führt den Beweis mit Aronhold's Methoden (Nr. 18) und zeigt, dass die Zahl der in den Koeffizienten von S enthaltenen Parameter gleich der der absoluten Invarianten von F ist.

A. Cauchy und K. G. J. Jacobi haben⁴⁹⁾ simultan zwei (allgemeine) F_2 : a_x^2, b_x^2 (speziell eine F_2 durch orthogonale S) in Aggregate von Quadraten übergeführt. Die Lösung hängt von der „charakteristischen“ Gleichung (Cauchy) $|a_{ik} + \lambda b_{ik}| = 0$ ab. Bei Boole⁵⁰⁾ ordnet sich die

p. 221; vgl. das Grenzverfahren von Hermite, ib. 83 (1877), p. 325. Eine allgemeingültige Ableitung giebt (vermöge einer Normalform der C_2) zuerst G. Cantor, Hab.schr. Halle 1869, s. das Buch von Bachmann l. c. — Die Cayley'sche Darstellung hat F. Prym, Gött. Abh. 38 (1892) auf die involutorischen S ausgedehnt, vgl. A. Cornely, Diss. Würzburg 1892.

43) Cambr. Dubl. math. J. 9 (1854), p. 63. Cayley wendet die Methode auf der F_2 ($n=4$) umschriebene Polygone an, Phil. mag. 96 (1853), p. 326 = Pap. 2, p. 105; ib. 4 (7) (1854), p. 208 = Pap. 2, p. 133; cf. A. Voss, Math. Ann. 25 (1885), p. 39; 26 (1885), p. 231; R. Sturm, ib. 26 (1886), p. 465 [III C 4].

44) Cayley, J. f. Math. 50 (1855), p. 288, 299 = Pap. 2, p. 192, 202.

45) Cayley, Lond. Tr. 148 (1858), p. 17 = Pap. 2, p. 475.

46) Lond. Tr. 148 (1858), p. 39 = Pap. 2, p. 497. Einfacher bei Th. Muir, Am. J. 20 (1898), p. 215.

47) Berl. Ber. 1866, p. 597 = J. f. Math. 68, p. 273 = Werke 1, p. 143.

48) J. f. Math. 68 (1867), p. 253. Vgl. Clebsch-Gordan, Abel'sche Funktionen, Leipzig 1866, Abschn. 12. Die absol. Inv. einer $F_{1,1}(x; u)$ schon bei C. W. Borchardt, J. f. Math. 30 (1846), p. 38.

49) A. Cauchy, Exerc. de math. 1829, 4, bes. p. 140; Jacobi, J. f. Math. 12, p. 1 = Werke 3, p. 191; Brioschi, Ann. di mat. 1 (1868), p. 158.

Aufgabe der simultanen Transformation von zwei F_n unter, *Cayley*⁵¹⁾ vereinfacht seine Methode.

*K. Weierstrass*⁵²⁾ untersucht die Änderungen, die die *Cauchy-Jacob*'schen Formeln für die Reduktion zweier F_2 auf Quadratsummen erleiden, wenn die Wurzeln von $|a_{ik} + \lambda b_{ik}| = 0$ nicht mehr alle ungleich sind, insbesondere für reelle S reeller F .

*Weierstrass*⁵³⁾ begründet das Kriterium für die Äquivalenz zweier

51) *Cayley*, *Cambr. Dubl. math. J.* 4 (1849), p. 47 = Pap. 1, p. 428; *Quart. J.* 2 (1858), p. 192 = Pap. 3, p. 129.

52) *Berl. Ber.* 1858, p. 207 = Werke 1, p. 233. *W.* präzisiert hier den Begriff des „allgemeinen“ Falles. Dazu die Erweiterungen von *E. B. Christoffel*, *J. f. Math.* 63 (1864), p. 255.

53) *Berl. Ber.* 1868, p. 310 = Werke 2, p. 19 (mit Zusätzen). Über eine „Lücke“ im Beweise und deren allmähliche arithmetisch-algebraische Ausfüllung durch *Stickelberger*, *Frobenius* u. A. s. „Muth“, Einleitung. [Die Elementarteiler und ihre Invarianz im wes. schon bei *Sylvester*, *Phil. Mag.* (4) 1 (1851), p. 119, 295, 415, vgl. die historische Darstellung bei *M. Noether*, *Math. Ann.* 50 (1898), p. 137]. Die Theorie bei *S. Gundelfinger*, in *Hesse's Raumgeom.* 3. Aufl. 1876; *L. Sawage*, *Ann. éc. norm.* (3) 8 (1891), p. 285; 10 (1893), p. 9; „Muth“; Verallgemeinerungen bei *K. Hensel*, *J. f. Math.* 115 (1895), p. 254; 117 (1897), p. 129, 333, 346.] Vgl. die geometrischen Anwendungen bei *F. Klein*, *Diss. Bonn*, 1868 = *Math. Ann.* 23, p. 539 auf die Einteilung der Linienkomplexe 2. Ordg. bei *W. Killing* auf den Schnitt von $2F_2$, *Diss. Berlin* 1872 (s. auch *Sylvester* l. c. und *Cambr. Dubl. math. J.* 5 [1850], p. 262). — Bez. modifizierter Darstellungen des Äquivalenzkriteriums vgl. *L. Stickelberger*, *Diss. Berlin* 1874; *J. f. Math.* 86 (1879), p. 20; *L. Maurer*, *Diss. Strassburg* 1887; *Ed. Weyr*, *Böhm. Ges. d. W.* 1889, *Jubelb.*; Auszug in *Monatsh. f. Math.* 1 (1890), p. 163 (mittels der Matrices); *B. Calò*, *Ann. di mat.* (2) 23 (1895), p. 159 (rational durch Det.-Umformungen); *G. Landsberg*, *J. f. Math.* 116 (1896), p. 331 (rat. Überführung der Scharen in ein. mittels *Kronecker's* Fundamentalsysteme [I B 1 c, Nr. 6]. — Nach *Frobenius* ist eine Schar von $F_{1,1}$ noch durch eine S mit $\geq n$ arbiträren Parametern in sich überführbar, *Zürich. Nat. G.* 41 (1896), p. 20. Äquivalenz von ∞^2 Scharen bei *S. Kantor*, *Münch. Ber.* 27 (1897), p. 367. Alternierende Scharen bei kongruenten S : *E. v. Weber*, *Münch. Ber.* 28 (1898), p. 369. „Ähnliche“ $F_{1,1}$: *G. Sforza*, *Giorn. di mat.* 32 (1894), p. 293; 33 (1895), p. 80; 34 (1896), p. 252. Eine spezifische Äquivalenz beim Hauptaxenproblem der C_2 : *S. Gundelfinger*, *Anal. Geom. der C_2* , hrsg. von *F. Dingeldey*, Leipzig 1895, Abschn. 1, §§ 8—10, danach ausführlicher *Ph. Brückel*, *J. f. Math.* 119 (1898), p. 210, 313. Die Äquivalenz zweier $F_{1,1}$ mit ihren „reziproken“ bei *C. Segre*, *Giorn. di mat.* 22 (1884), p. 29; die zweier f_4 bei *Frobenius*, *J. f. Math.* 106 (1890), p. 125; *Klein-Fricke*, *Modulfunktionen*, Leipzig 1890, § 4; die zweier $f_2(x; y)$ bei *Frobenius* l. c. *Study* untersucht den Zusammenhang der $F_{1,1}$ mit den rekurreierenden Reihen, *Monatsh. f. Math.* 2 (1891), p. 1. — Die Äquivalenz einer $F_{1,1}$ ($n=3$) für konjugierte Koeffizienten und Variable studieren *H. Poincaré*, *Par. C. R.* 98 (1884), p. 344; *É. Picard*, *ib.* p. 416; allgemein *A. Loewy*, *Nova Acta Leop.* 71

Scharen $F_2 + \lambda G_2$, $F_2' + \lambda G_2'$: „dass deren Determinanten D , D' in ihren Elementarteilern (I C 2) ε , ε' übereinstimmen müssen“. Dabei geben die ε an, ob und wie oft ein mehrfacher Teiler von D in allen Minoren $(n-1)^{\text{ten}}$, $(n-2)^{\text{ten}}$... Grades aufgeht. Die Koeffizienten von $|a_{ik} + \lambda b_{ik}| = 0$ sind rationale⁵⁴⁾, die ε irrationale Invarianten der Schar $F_2 + \lambda G_2$.

Behufs Entscheidung über die Äquivalenz von zwei gegebenen Schaaren reduziert sie *Weierstrass* auf sachgemässe kanonische⁵⁵⁾ Gestalten, deren Variabeln von den ε resp. ε' abhängen. Sollen die ε , ε' existieren, darf D resp. D' nicht (in λ) $\equiv 0$ sein. *L. Kronecker*⁵⁶⁾ erledigt auch diesen Fall durch geeignete Teilung der Variabeln in zwei Gruppen. Für Scharen, die wenigstens eine „definite“ Form (d. i. von konstantem Vorzeichen [I C 2]) enthalten, führt *Kronecker* die Reduktion direkt durch, und leitet erst daraus die Äquivalenzeigenschaft der ε , ε' ab. Die ε ersetzt *Kronecker*, für F_2 , wie für $F_{1,1}$, durch rationale Invarianten, die grössten gemeinsamen Teiler τ_i aller Minoren von $D(F_2 + \lambda G_2)$ je derselben Ordnung i .

Die Gleichheit der τ_i und τ_i' ⁵⁷⁾ reicht nicht immer als Äquivalenzkriterium hin; ein solches leisten aber stets die „elementaren“ Scharen,

auf „Schwingungen“ finden sich bei *F. Pockels*, Über die part. Diffgl. $\Delta u + k^2 u = 0$, Leipzig 1891, p. 44; *E. B. Christoffel*, J. f. Math. 63 (1864), p. 273; *Weierstrass* l. c. *E. J. Routh*, Dynamics ... 5. ed., London 1891, Part. VII (deutsch v. *A. Schepp*, Leipzig 1898). — Diesen Anwendungen auf Schwingungen entsprechen rein mathematisch solche auf lineare Differentialgleichungen, vgl. dazu noch *Weierstrass* (Berl. Ber. 1875 = Werke 2, p. 75), sowie *L. Heffter's* „Lineare Differentialgleichungen“, Leipzig 1894, Kap. 9 [II B 3 c].

54) *Weierstrass*, 1868 l. c.; vgl. *J. Rosanes*, J. f. Math. 80 (1875), bes. p. 54. Für $G_2 \equiv \sum x^2$ schon bei *L. Fuchs*, J. f. Math. 66 (1866), bes. p. 132; *Christoffel*, ib. 68 (1867), bes. p. 270; *M. Hamburger*, ib. 76 (1873), bes. p. 115; *F. Siacci*, Ann. di mat. (2) 4 (1873), p. 296.

55) Über den Begriff des Kanonischen vgl. *Kronecker*, Berl. Ber. 1874, p. 72. — *W.* gelangt dazu, für beliebiges n F_2 -Scharen hinzuschreiben, deren D vorgeschriebene ε haben.

56) Berl. Ber. 1868, p. 339 = Werke 1, p. 163. *Kronecker* folgend bringt *A. Kneser* ausnahmslos eine F_2 durch orthog. S auf eine Quadratsumme: Arch. f. Math. (2) 15 (1897), p. 225. — Wegen der Reduktion einer $F_{1,1}$ durch biorthogonale S s. *E. Beltrami*, Gi. di mat. 11 (1873), p. 89; *E. Cosserat*, Toul. Ann. 3 (1889), p. 1; *Sylvester*, Par. C. R. 108 (1889), p. 651; Mess. (2) 19, p. 1, 42.

57) Berl. Ber. 1874, p. 59, 149, 206 = Werke 1, p. 349. Weitere Ausführung ib. 1890, p. 1225, 1375; 1891, p. 9, 33. Einfacher mittels Partialbruchzerlegung bei *Frobenius*, Berl. Ber. 1896, p. 7; hier deckt *F.* auch den inneren Grund des *Weierstrass-Kronecker'schen* Satzes auf, dass 2 äquivalente F_2 -Scharen

für die $D \equiv 0$ oder die Potenz einer Linearform ist. Eine Schar von $F_{1,1}$ ist stets, und im wesentlichen nur auf eine Art, als Aggregat von elementaren darstellbar; diese, nebst ihrer Anzahl, sind die „wahren“⁵⁸⁾ Invarianten der Äquivalenz.

Kronecker bedarf dabei der Ausdehnung der von ihm (s. oben) für besondere Scharen gegebenen Reduktion auf beliebige, indem jetzt ganze Gruppen⁵⁹⁾ von Variablen zugleich entfernt und durch „kanonische“ ersetzt werden. Bei geeigneter Anordnung bleibt die *Weierstrass*’sche Reduktion selbst für $D = 0$ gültig⁶⁰⁾. *Kronecker* nimmt nunmehr die automorphe Transformation einer $F_{1,1}$ bei identischen S (vgl. oben) wieder auf⁶¹⁾. Für $D \equiv 0$ hängt $F_{1,1}$ von einer geringeren Zahl von Variablen ab und kann als Form mit $D \equiv 0$ geschrieben werden. Es ordnen sich die kanonischen Gestalten der $F_{1,1}$ unter vier „reduzierte“ Typen⁶²⁾ ein. Wie oben, wird mit rationalen, „arithmetischen“ Invarianten operiert⁶³⁾. Die arithmetische und formentheoretische Behandlung hat *H. Rosenow*⁶⁴⁾ für eine $F_{1,1}(x_1, x_2, x_3; y_1, y_2, y_3)$ gegenübergestellt. — Die *Weierstrass-Kronecker*’schen Sätze von 1868 leitet *G. Darboux*⁶⁵⁾ auf der Grundlage der geränderten Schardeterminanten D, D_1, D_2, \dots ab, die sich analog verhalten, wie die *Sturm*’schen Funktionen (I B 3 a, Nr. 5); die Formenschar wird als Quotient $D_{i+1} | D_i$ dargestellt und durch Partialbruchzerlegung auf die kanonische Gestalt gebracht.

Umgekehrt hat man nach der Untergruppe Γ von S gefragt, die überhaupt irgend eine F_2 resp. $F_{1,1}$ automorph transformiert; die Formen werden nachträglich ermittelt.

Die „Fundamentalgleichung“⁶⁶⁾ einer solchen S : $|\sigma_{11} - \varphi, \sigma_{12}, \dots| = 0$

58) l. c. (1874), p. 60.

59) Vgl. die (für *J.* erfolglose) Polemik zwischen *Jordan* und *Kronecker*: *J.* in Par. C. R. 77 (1873), p. 1487, *Kr.* ib. p. 71; *J.* (1874) in *J. de math.* (2) 19, p. 35; Par. C. R. 78 (1874), p. 614, 1763; *J. de math.* (2) 19, p. 397 (korrekt); *Kr.* 1874, l. c., p. 206.

60) Die Methode von *Jacobi* (*J. f. Math.* 53, p. 265 = Werke 3, p. 585) galt nur für symm. u. altern. $F_{1,1}$.

61) Berl. Ber. 1874, p. 397 = Werke 1, p. 421.

62) l. c. p. 430.

63) Vgl. die unter Anm. 59 citierten Ergänzungen von *Kr.* 1890, 1891.

64) *J. f. Math.* 108 (1890), p. 1; Progr. Berlin. 4. höh. Bürgersch. 1891, 1892.

65) *J. de math.* (2) 19, p. 347. Für $n = 3$ vereinfacht bei *H. Vogt*, *Nouv. Ann.* (3) 15 (1896), p. 441.

66) *Kronecker*, *J. f. Math.* 68 (1866), bes. p. 276 = Werke 1, p. 143; *E. B. Christoffel*, ib. 68 (1867), p. 253. Für orthog. S schon bei *F. Brioschi*, *Ann. sc. mat. fis.* 5 (1854), p. 201; *L. Schläfli*, *J. f. Math.* 65 (1866), p. 185.

ist nach *Kronecker*⁶⁷⁾ „reziprok“. *J. Rosanes*⁶⁷⁾ zeigt, dass zu jeder reziproken Fundamentalgleichung im allgemeinen eine S und damit eine F_2 gehört.

In diesem Sinne hat *G. Frobenius*⁶⁸⁾ die Γ der F_2 , und darüber hinaus der „symmetrischen“ und „alternierenden“ $F_{1,1}$, mit allen Ausnahmen untersucht. Die a_{ik} repräsentieren⁶⁹⁾ eine S einer Variablenreihe; die Transformationen einer $F_{1,1}$ erscheinen so als „Multiplikationen“ von S ; der Algorithmus beherrscht auch gewisse Multiplikationen von höheren komplexen Zahlen⁷⁰⁾ (I A 4, Nr. 10). Solange $D \not\equiv 0$, befolgen die ε der „charakteristischen Funktion“ ein einfaches Gesetz; bei $D \equiv 0$ hat die Funktion einer Teilbarkeitsbedingung zu genügen. Die *Cayley-Hermite*'schen Formeln (s. oben) werden durch ein theoretisches Grenzverfahren auf die Ausnahmefälle ausgedehnt⁷¹⁾. — Von *Frobenius*⁷²⁾ rührt auch ein formentheoretisches Kriterium des „*Pfaff*-schen Problems“ (II A 5) her, i. e. der Äquivalenz von zwei n -gliedrigen linearen Differentialformen bei allgemeinen Punkttransformationen. *L. Stickelberger*⁷³⁾ untersucht die Γ der eine definite F_2 invariant

67) J. f. Math. 80 (1875), p. 52. *R.* bringt die bez. S auf die „antisymmetrische“ Gestalt: $\sum \sigma_{ik} x_i = \varepsilon \sum \sigma_{ki} x_k$ ($\varepsilon = \pm 1$).

68) J. f. Math. 85 (1877), p. 1. Vgl. dazu noch: ib. 86 (1879), p. 44, 146; 88 (1880), p. 96. Die autom. Transf. der F_2 ($n=4$) hat *F. Lindemann* [Vorl. über Geom. von *A. Clebsch*, Leipzig 1891, Abschn. II, 17] durch lineare Zuordnung eines linearen Komplexes incl. der Ausnahmen durchgeführt; *A. Loewy* danach (im Umriss) für n Var.: Nova Acta Leop. 65 (1895), p. 1, mit Anwendungen auf Linien- u. Kugelgeometrie. *A. Voss* legt den algebraischen Kern des Verfahrens bloss Münch. Ber. 26 (1896), p. 1, 211; *Lindemann*, ib. p. 31 geht auf die Ausnahmefälle ein, und führt die verschiedenen Äqu.bedingungen in ein. über.

69) Vgl. *Cayley*, Anm. 45.

70) Vgl. darüber *R. Lipschitz*, „Untersuchungen über die Summe von Quadraten“, Bonn 1886; J. de math. (4) 2 (1886), p. 373; Berl. Ber. 1890, p. 485; *Kronecker* s. Anm. 41; *E. Study*, Chicago Congr. Pap. 1896 (1893), p. 367, wo weitere Litteratur, und vor allem noch *A. Hurwitz*, Gött. Nachr. 1896, p. 314; *E. Cartan*, Toul. Ann. 12 B (1893), p. 1 [I A 4, Nr. 14]. Die komplexen Zahlensysteme formentheor. bei *Cyp. Stéphanos*, Athen, Jubil.-Band, 1888.

71) Wie das Grenzverfahren bei den orthog. S zu umgehen sei, hat *H. Taber* eingehend verfolgt Lond. M. S. Pr. 24 (1893), p. 290; 26 (1895), p. 364; N. Y. B. 3 (1894), p. 251; Math. Ann. 46 (1895), p. 561, Am. Ac. P. 31 (1896), p. 181, 336; Chic. Congr. P. 1896 (1893), p. 395. *T.* stützt sich dabei auf einen Satz von *Sylvester* (Par. C. R. 94 [1882], p. 55), und teilt die orth. S in 2 Klassen, je nachdem sie durch Wiederholung einer infin. orth. S erzeugbar sind oder nicht, vgl. Anm. 77.

72) J. f. Math. 82 (1877), p. 230; *R. Forsyth*, Diff. equations 1, Cambridge 1890, Chap. 11 (deutsch v. *H. Maser*, Leipzig 1892); *G. Morera*, Tor. A. 18 (1883), p. 383. Für $n=2$ schon bei *Christoffel*, J. f. Math. 70 (1870), p. 46, 241.

73) Progr. Zürich Polyt. 1877, p. 1. Die einfachen ε verwendet implicite schon *Cauchy* l. c. (1829).

lassenden S , die auf eine trigonometrische Normalform gebracht werden; die charakteristische Funktion hat nur einfache ε .

Die Methode von *Frobenius* hat *A. Voss*⁷⁴⁾ auf beliebige $F_{1,1}$ ausgedehnt, so, dass die Hilfsprozesse *rational* durchführbar werden. Das System der in den a_{ik} quadratischen Transformationsrelationen lässt sich durch ein lineares ersetzen; die symmetrischen und alternierenden $F_{1,1}$ sind dabei ausgezeichnet. Löst eine S das Problem, so hat man nur noch alle mit S „vertauschbaren“ Substitutionen $T (ST = TS)$ zu suchen⁷⁵⁾. Die Endformeln werden den *Cayley-Hermite'schen* analog.

Auch *C. Jordan*⁷⁶⁾ überträgt die durch die ε bedingte Einteilung der F_2 in kanonische Klassen und Unterklassen auf die S selbst.

Der Charakter der Gruppe der eine $F_{1,1}$ invariant lassenden S , sowie von deren Untergruppen, ist noch wenig⁷⁷⁾ für die Äquivalenz nutzbar gemacht. In *S. Lie's* Theorie der kontinuierlichen Transformationsgruppen (II A 6) ist die dreigliedrige Gruppe Γ von Bedeutung, die eine $F_2(x_1, x_2, x_3)$ invariant lässt. Die Transformationsgruppen zerfallen⁷⁸⁾ in „integrable“ und „nicht integrable“, je nachdem in ihnen Γ als Untergruppe enthalten ist oder nicht⁷⁹⁾.

4. Äquivalenz von Formen höherer als der zweiten Ordnung. *G. Boole*⁸⁰⁾ erweitert die orthogonale Transformation der F_2 (Nr. 1, 3),

74) *Math. Ann.* 13 (1878), p. 320; *Gött. Nachr.* 1887, p. 425; *Münch. Abh.* 17 (1890), p. 3. [Insbes. die „konjugierten“ S : *Münch. Ber.* 19 (1889), p. 175; 26 (1896), p. 273; *A. Loewy* *ibid.* 26 (1896), p. 25.] Wegen gewisser „singulärer“ Fälle vgl. *Frobenius*, *J. f. Math.* 84 (1878), p. 1; *Kronecker*, *Berl. Ber.* 1890, p. 525. 602. 692. 873. 1063; *A. Loewy*, *Math. Ann.* 48 (1876), p. 97; 49 (1897), p. 448 [I B 1 c, Nr. 22].

75) Auf anderem Wege bei *Voss*, *Münch. Ber.* 19 (1889), p. 233.

76) *J. de math.* (4) 4 (1888), p. 349.

77) *S. Lie*, *Christ. Abh.* 1885; *H. Werner*, *Math. Ann.* 35 (1889), p. 113; *W. Killing*, *ib.* 36 (1890), p. 239. *F. Engel* hat betont, dass nicht jede S der, eine gewisse F_2 invariant lassenden proj. Gruppe, durch Wiederholung der infin. S der Gruppe erzeugbar ist, *Leipz. Ber.* 44 (1892), p. 279; 45 (1893) [mit *E. Study*] p. 659 [Nr. 6, *Anm.* 145, Schluss]. Für $F_2 = \sum x^2$ bei *Taber* s. *Anm.* 71.

78) *S. Lie*, *Norw. Arch.* 3 (1874), p. 112; *F. Engel*, *Leipz. Ber.* 1887, p. 95; *W. Killing*, *Math. Ann.* 36 (1890), p. 161.

79) Geometrisches über bil. resp. tril. Formen noch bei *M. Pasch*, *Math. Ann.* 38 (1891), p. 24; *P. Muth*, *ib.* 40 (1892), p. 89; 42 (1893), p. 257; *A. del Ré*, *Rom. Linc. R.* (4) 6 (1890), p. 237; 7 (1891), p. 88; *Battaglini* (s. Monographien) [III C 9]. — Die $f_{1,1}$ eingehend, mit Anwendungen auf die Drehungen des Raumes um einen festen Punkt, bei *Cyp. Stephanos*, *Math. Ann.* 25 (1883), p. 299. — Von besonderem Interesse sind die Untersuchungen von *Rosanes* über „abhängige Punktsysteme“, *J. f. Math.* 88 (1880), p. 241; 90 (1881), p. 303; 95 (1883), p. 247; 100 (1887), p. 311.

80) Vgl. *Anm.* 9.

indem er fragt, wann zwei Formenpaare $F_n, G_n; F'_n, G'_n$ äquivalent sind. Einmalige totale Differentiation der Äquivalenzen liefert die Bedingung, dass die gleich Null gesetzten Diskriminanten von $F + \lambda G, F' + \lambda G'$ zu den nämlichen Gleichungen in λ führen (Nr. 25). Hierauf wird der Fall von mehr als zwei Urformen, auch ungleicher Ordnung, zurückgeführt. *S. Aronhold*⁸¹⁾ macht das „Äquivalenzproblem“ erst für C_3 , dann überhaupt für zwei allgemeine⁸²⁾ Formen $F_p(x|a), F'_p(x'|a')$ zum Kern der ganzen Theorie. Eine Abzählung ergibt, dass, abgesehen von $p=2$; $p=3, n=2$ Transformierbarkeitsbedingungen existieren; sie lassen sich im Verlauf der Elimination der S -Koeffizienten σ so anordnen, dass ihre rechten Seiten von den σ unabhängig werden. Das führt zu n^2 Differentialgleichungen⁸³⁾ (Nr. 13, 18), die wiederum so umgestaltet werden, dass die σ in ihnen nicht mehr auftreten. Daraus lässt sich rückwärts schliessen, dass die Bedingungen als Gleichheiten von Brüchen $\varphi(a) = \varphi(a')$ (Nr. 2) geschrieben werden können, wo die φ die rationalen Lösungen der n^2 Differentialgleichungen sind, aus deren linearer Unabhängigkeit⁸⁴⁾ auch entnommen wird, wieviel unter den φ rational unabhängig sind.

Der „Aronhold'sche Prozess“ $\sum b_i \frac{\partial}{\partial a_i}$ (Nr. 2, 13) erlaubt die Ausdehnung auf eine Reihe von Urformen F und führt zu den Zusammenhängen zwischen den Arten von Komitanten. Das Operieren mit den Differentialprozessen wird durchsichtiger, wenn man die F symbolisch (Nr. 12) als volle Potenzen von Linearformen ansetzt.

Wenn F_p, G_p auf die nämliche „typische“ Gestalt (Nr. 7) gebracht werden können, so existiert auch eine S , die F in G überführt. Daraus leitet *Clebsch*⁸⁵⁾ als Kriterium für die Äquivalenz von zwei f_p her, dass ausser gleichen absoluten Invarianten ein paar über-

81) J. f. Math. 62 (1863), p. 281; für C_3 schon ib. 55 (1858), p. 97.

82) l. c. 1855, bes. p. 160. Modifikationen für nicht allgemeine F_n bei *W. Veltmann*, Zeitschr. f. Math. 22 (1877), p. 277; ib. 34 (1889), p. 321.

83) Umg. geht *L. Maurer* von den Differentialgleichungen aus: Münch. Ber. 18 (1888), p. 103; 24 (1894), p. 297; 29 (1899), p. 147.

84) Einfachere Beweise bei *Aronhold*, J. f. Math. 69 (1868), p. 185; *Christoffel*, Math. Ann. 19 (1881), p. 280. Höhere Abhängigkeiten zwischen den Differentialgleichungen bei „Study“ p. 167.

85) Math. Ann. 2 (1870), p. 373; Beispiele (f_5, f_6) bei *Clebsch-Gordan*, Ann. di mat. (2) 1 (1867), p. 23. *Cayley* nahm irrthümlicherweise das Gegenteil an, Math. Ann. 3 (1870), p. 268. Für f_6 , deren Ausartung die einer dreifachen Wurzel nicht erreicht, genügt die Gleichheit der abs. Invarianten: *O. Bolza*, Math. Ann. 30 (1887), p. 546, ausführlicher in Amer. J. 10 (1887), p. 47.

einstimmender, in x_1, x_2 linearer bezw. quadratischer Kovarianten existiert; die Typik wird dann ermöglicht. *P. Gram*⁸⁶⁾ knüpft an *Aronhold* an. Um bei der Herleitung der Gleichheit der absoluten Invarianten die Differentialgleichungen zu vermeiden, werden, in Anlehnung an *Gauss*⁸⁷⁾, die Resultanten aus den Transformationsrelationen für ein Paar F_p, G_p , dann für ein zweites F_p, H_p aufgestellt, und die Koeffizienten von F eliminiert. Jede Komitante von F wird aus Polarenbildungen bezüglich der σ (Nr. 13) ganz-rational komponiert; hieraus fliesst als Äquivalenzkriterium ausser der Gleichheit der absoluten Invarianten das identische Verschwinden derselben Kovarianten. Wann aber reicht das erstere hin? Indem *E. B. Christoffel*⁸⁸⁾ alle zu einer gegebenen Form F äquivalenten sucht, „normiert“ er den Gang der Elimination der σ ; die Anzahl der in den Schlussgleichungen verbleibenden σ wird von der Folge der Eliminationen unabhängig. Der Maximalwert dieser Anzahl ist n^2 ; die Äquivalenz von F_p, G_p hängt dann nur von der Übereinstimmung der n^2 absoluten Invarianten ab. Die ausgeschlossenen Fälle gehören ausgearteten⁸⁹⁾ Grundformen an, deren allgemeine invariantentheoretische Beherrschung noch offen steht (Nr. 6, 11, 15).

5. Automorphe Formen. Invarianten endlicher Gruppen. Bei der Frage nach den algebraischen Integralen der hypergeometrischen Differentialgleichung $D_2(x, y) = 0$ (II B 4 c) stiess *H. A. Schwarz*⁹⁰⁾ auf automorphe Gleichungen $f_n = 0$. Der Quotient η zweier Partikularlösungen y_1, y_2 genügt einer Differentialgleichung 3. Ordnung: die positive „ x -Halbebene“ bildet sich konform ab auf ein Kreisbogendreieck Δ auf der Kugel, das durch „symmetrische Wiederholung“ über die Seiten hinaus „fortsetzbar“ ist. Die Anzahl der Δ ist endlich, wenn η algebraisch von x abhängt, und umgekehrt.

Es giebt für die Typen von Δ eine begrenzte Anzahl; die zu-

86) Math. Ann. 7 (1874), p. 230. Vgl. *Gundelfinger* bei „*Salmon-Fiedler*“ (1877), p. 452; „*Study*“ p. 104.

87) *Disquis. arithm.*, Abschn. 5.

88) Math. Ann. 19 (1881), p. 280, vgl. *Study* l. c.

89) Für solche Formen verschwinden alle Invarianten. Welche Rolle diese „Nullformen“ für die ganze Theorie spielen, zeigt *Hilbert*, Math. Ann. 42 (1893), p. 313 [Nr. 6, Schluss].

90) Zürich. Naturf. G. 1871, p. 74; J. f. Math. 75 (1873), p. 292 = Ges. Abh. p. 172, 211 (dort frühere Cit. in Abschn. 6). Vgl. für die ganze Nr. *L. Schlesinger*, Lineare Differentialgleichungen, Leipzig 1895/97; ferner I B 3 f, wo die Frage nach den Normalgleichungen massgebend ist.

gehörigen automorphen f_n ⁹¹⁾ werden nebst der jeweils herrschenden Syzygie entwickelt.

*F. Klein*⁹²⁾ gelangt direkt zu allen automorphen f_n , oder, was auf dasselbe hinauskommt, zu allen endlichen Gruppen binärer S , und führt die formentheoretischen Gesichtspunkte ein.

Die S einer (komplexen) Variablen x werden vermöge ihrer Deutung auf der „Riemann'schen Kugel“⁹³⁾ (II B 1) den nichteuklidischen „Bewegungen“⁹⁴⁾ des Raumes (mit der Kugel als Fundamentalfläche) (III A 1) eindeutig zugeordnet, deren endliche Gruppen G der Anschauung zugänglich sind; bei den endlichen Gruppen bleibt ein Punkt des Kugellinnern fest (s. die Verallg. Anm. 115), den man in den Mittelpunkt der Kugel werfen kann. Exclusive zwei triviale Fälle, sind es die G_{12} , G_{24} , G_{60} der Drehungen, die die regulären Körper (Tetraeder, Oktaeder resp. Würfel, Ikosaeder resp. Dodekaeder) mit sich zur Deckung bringen.

Wendet man die S , etwa der G_{60} , auf zwei Werte x, x' an, so entstehen je 60 Werte als Wurzeln zweier Gleichungen $\pi_{60}=0, \pi'_{60}=0$; in der Schar $\pi + k\pi'$ befinden sich gerade drei volle Potenzen von Formen f_{12}, h_{20}, t_{30} [wo $h = (f, f)_2, t = (f, h)_1$], die nebst einer Invariante i das „volle System“ (Nr. 6) von G_{60} bilden. Zwischen f, h, t besteht eine Syzygie.

Die drei Formen f , sc. f_4, f_6, f_{12} sind durch $(f, f)_4 \equiv 0$ nebst Angabe ihrer bez. Ordnung charakterisiert⁹⁵⁾. Die „Ikosaedergleichung“

91) Insbes. tritt l. c. p. 330 die „Ikosaederform“ in der kanon. Gestalt $s(1 - 11s^5 - s^{10})$ auf.

92) Erlang. Ber. 1874 Juli (unabh. v. *Schw.*), Dez. Die Syzygie erscheint als ein bekannter Satz über Funktionaldet. Ib. 1875 (Juli) die Resolventen der Ikosaedergl. Die zusammenfassende Arbeit in Math. Ann. 9 (1875), p. 183. Modifizierte Darst. (ohne die nicht-euklidischen Bewegungen) bei *G. Fano*, Monatsh. f. Math. 7 (1896), p. 297. Erweiterungen auf höhere Räume bei *O. Biermann*, Wien. Ber. 95 (1887), p. 523; *E. Goursat*, Par. C. R. 106 (1888), p. 1786. Vgl. „Clebsch-Lindemann“², Abt. 3, IX, X.

93) Das Doppelverhältniss von 4 Kugelpunkten studiert *L. Wedekind*, Diss. Erlangen 1874; Math. Ann. 9 (1875), p. 209. Für die ganze Auffassung vgl. *Klein*, Progr. Erlangen 1872. f_n (bes. f_3) mit komplexen Koeff. werden systematisch zuerst von *E. Beltrami*, Bol. Mem. 10 (1870) untersucht.

94) Vgl. z. B. *F. Lindemann*, Math. Ann. 7 (1874), p. 56. Für gewöhnliche Massbestimmung waren die bez. Gruppen von *C. Jordan* bestimmt, Ann. di mat. (2) 2 (1868), p. 168, 320. Vgl. *A. Schoenflies*, Math. Ann. 28 (1887), p. 319; 29 (1887), p. 50; 34 (1889), p. 172.

95) *L. Wedekind*, Habilitationsschrift, Karlsruhe 1876; *Brioschi*, Ann. di mat. (2) 8 (1877), p. 24; *G. Halphen*, Par. Sav. Ét. (2) 28 (1880/83). Vgl. „Gordan“², § 19. Die f_n mit $(n-1)$ -fachem Linearfaktor sind uneigentliche Lösungen. [Die Beziehung $(f, f)_4 \equiv 0$ schon bei *Klein* l. c.] *Hilbert* untersucht allgemeiner

$f_{12} = 0$ ist eine Resolvente der allgemeinen Gleichung 5. Ordnung, und bildet den Kern von deren „Auflösungstheorie“⁹⁶⁾.

Ein anderer Weg zu diesen Formen ist folgender. Das allgemeine Integral y einer linearen Differentialgleichung $D_n(x, y) = 0$, mit rationalen Koeffizienten, ist eine Linearform von n partikulären y_1, y_2, \dots, y_n (II B 4). Umkreist x eine „singuläre“ Stelle von $D_n = 0$, so erleiden die y_i nach *L. Fuchs*⁹⁷⁾ eine S mit konstanten Koeffizienten. Der Inbegriff der S bildet die „Gruppe“ G von $D_n = 0$; die Endlichkeit von G ist das Kriterium, dass $D_n = 0$ lauter algebraische Integrale besitzt. Das Kriterium sei für eine $D_2 = 0$ erfüllt, so existieren, wie *L. Fuchs*⁹⁸⁾ nachweist, gegenüber G automorphe Formen von y_1, y_2 , als Wurzeln aus rationalen Funktionen von x ; diese „Primformen“ decken sich mit den obigen $\pi + k\pi'$. Für die Primformen niederster Ordnung n verschwinden alle Kovarianten⁹⁹⁾ von einer Ordnung $< n$; n ist daher nur einer endlichen Anzahl von Werten fähig¹⁰⁰⁾, nämlich $n = 2, 4, 6, 8, 10, 12$.

*Klein*¹⁰¹⁾ stellt alle derartigen Typen von $D_2 = 0$ auf, ausgehend von den (5) möglichen Integralgleichungen für $s = y_1/y_2$; die bez. Differentialgleichungen 3. Ordnung für s entstehen durch beliebige rationale Substitution aus den von *Schwarz* (s. oben) erhaltenen.

Math. Ann. 30 (1887), p. 561 *Büschel* $\varphi_n + \lambda\psi_n$, für die $(\varphi, \psi)_3 \equiv 0$. Bei „Gordan“ 2, § 13 resultieren die reg. Körper, wenn von einer Reihe von $\varphi_2^{(i)}$ ($i = 1, 2, \dots$) verlangt wird, dass $(\varphi_2^{(i)}, \varphi_2^{(k)})_1 = \pm \text{const.}$ (incl. 0) ist. Bei *Brtschi* der analoge Fall einer f_3 , wo $(f, f)_4 \equiv cf$: *Chelini*, Coll. M. 1881, p. 213; *Par. C. R.* 96 (1883), p. 1689.

96) Vgl. die zusammenfassende Darst. bei *F. Klein*, Ikosaeder, Leipzig 1884, sowie *Gordan*, Math. Ann. 28, p. 152; 29, p. 318 (1887), sowie I B 3 f und Nr. 11, Ann. 219.

97) *J. f. Math.* 66 (1866), p. 121; 68 (1868), p. 354 [der Grundgedanke schon bei *Riemann*]. S. das Handbuch von *L. Schlesinger*.

98) *Gött. Nachr.* 1875 (Aug.), p. 568, 612; *J. f. Math.* 81 (1876), p. 97. Die Primformen systematisch ib. 85 (1878), p. 1; eine Weiterentwicklung des Begriffes bei *C. Jordan*, *J. f. Math.* 84 (1877), p. 85; *L. Schlesinger*, ib. 110 (1892), p. 130.

99) Die Umkehrung bei *Gordan*, Math. Ann. 12 (1877), p. 147.

100) l. c. (1876), p. 126. Einige der Fälle können nicht eintreten: *Klein*, Math. Ann. 11 (1876), p. 118, sodass nur die der regulären Körper $n = 2, 4, 6, 12$ verbleiben.

101) *Erlang. Ber.* 1876; Math. Ann. 11 (1876), p. 115; 12 (1877), p. 167. *Jordan's* Typen (*Par. C. R.* 82, p. 605; 83, p. 1033 (1876), waren unvollständig, s. *Klein*, Math. Ann. 11 (1876), p. 118. In der *Schwarz'schen* Gleichung ersetzt *Klein* x durch eine rat. Funktion $R(x)$. Umgekehrt wird $R(x)$ bei gegebener Differentialgl. für η bestimmt. Weiteres s. „Inv.-Ber.“ p. 127.

Mit *Hermite's* associierter Darstellung (Nr. 7) hat *F. Brioschi*¹⁰²⁾ die vollen Systeme der Primformen hergeleitet.

Rein algebraisch hat die automorphen f_n *Gordan*¹⁰³⁾ untersucht. Ist S auf die Gestalt $\frac{y-\alpha}{y-\beta} = e^{2i\varphi} \frac{x-\alpha}{x-\beta}$ gebracht, so resultiert S^n für $n\varphi$ statt φ ; soll S einer endlichen Gruppe angehören, muss $n\varphi$ ein Multiplum von π sein und umgekehrt. Auf Grund einer einfachen Relation zwischen den φ der Substitutionen $S, T, ST, S^{-1}T$ wird die Aufgabe dahin reduziert, die Gleichung $1 + \cos \varphi_1 + \cos \varphi_2 + \cos \varphi_3 = 0$ durch rationale Winkel $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ zu befriedigen. Die 5 resultierenden Gruppen von S werden auf eine kanonische Gestalt gebracht.

Die endlichen Gruppen G von $S(y_1, y_2, \dots, y_n)$ hat *C. Jordan*¹⁰⁴⁾ substitutionentheoretisch erforscht und die Methode auf $n = 3$ angewandt. Unter den S sind s , die die y_i nur um multiplikative Einheitswurzeln ändern. Die mit einer s vertauschbaren Untergruppen G' von G werden „durch G transformiert“ (I A 6, Nr. 3, 16); zwischen den Ordnungen der G' und von G besteht eine diophantische Gleichung. Deren umständliche und undurchsichtige Diskussion führt für $n = 3$ zu 11 Typen, von denen aber nur einer wesentlich über den Fall $n = 2$ hinausgeht: d. i. die „Hesse'sche“ G_{216} ,¹⁰⁵⁾ die die Figur der 4 Wendedreiseite einer C_3 (III C 3) invariant lässt.

Rechenfehler liessen *Jordan* dabei 2 neue ternäre G übersehen. Einmal eine G_{168} ,¹⁰⁶⁾ die *Klein* von der Transformation 7. Ordnung der elliptischen Funktionen her entdeckte (II B 6a). Durch eine isomorphe (I A 6, Nr. 14) ternäre G_{168} geht die $C_4 \equiv x_1^3 x_2 + x_2^3 x_3 + x_3^3 x_1 = 0$

102) Math. Ann. 11 (1876), p. 401.

103) Math. Ann. 12 (1877), p. 23. Die *Fuchs'sche* Eigenschaft der Primformen niederster Ordnung benutzt *Gordan* zu deren unabhängiger Aufstellung.

104) Par. C. R. 84 (1877), p. 1446; J. f. Math. 84 (1877), p. 85; Preisschrift Nap. Atti 8 (1888).

105) Das volle System bei *H. Maschke*, Math. Ann. 33 (1889), p. 324. Die vier fund. Inv. der Gruppe berechnet *A. Boulanger*, Par. C. R. 122 (1896), p. 178 auf Grund eines allgem. Satzes von *P. Painlevé* über tern. endliche Gruppen, ib. 104, p. 1829; 105, p. 58 (1887). — Die „monomiale“ ternäre Gruppe, die ein Dreieck invariant lässt, studiert *Maschke*, Amer. J. 17 (1895), p. 168. Eine wichtige „uneigentliche“ quat. Gruppe ist die der „*Kummer'schen* Konfiguration“ (III C 6), vgl. *E. Study*, Leipz. Ber. 1892, p. 122; die Untersuchung ist typisch wegen der Methode der „Reihenentwicklungen“ (Nr. 17) und der „Apolarität“ (Nr. 24).

106) Math. Ann. 14 (1879), p. 428 bes. 438; ib. 17 (1881) (mit Berücksichtigung der w). Ausführlich in *Klein-Fricke's* „Modulfunktionen“, Leipzig 1890, 1, Abschn. 3, Kap. 6. Die *Klein-Riemann'sche* Fläche [II B 2, III A 4, III C 2] von $f = 0$ genauer bei *W. Haskell*, Am. J. 13 (1890), p. 1.

in sich über. Das volle System der C_4 (oder auch der Gruppe) besteht aus C_4 und 3 durch eine Syzygie verknüpften Kovarianten. Die „Galois'sche Resolvente“ (I B 3 c, d, Nr. 10, 23) besitzt eine Resolvente 7. und 8. Ordnung, und umgekehrt hat *Gordan* jede¹⁰⁷⁾ $f_7 = 0$ mit einer G_{168} explicite darauf zurückgebracht (II B 6 a). Sodann hat *G. Valentiner* bei Vereinfachung und Revision der *Jordan*'schen Untersuchung eine neue ternäre G_{360} ¹⁰⁸⁾ aufgefunden. *A. Wiman*¹⁰⁹⁾ hat deren Natur erforscht; sie ist einfach und holoeidrisch isomorph mit der G_{360} der geraden Vertauschungen von 6 Dingen. *R. Fricke*¹¹⁰⁾ hat einen funktionentheoretischen Zugang zu der Gruppe eröffnet. —

Einzelne endliche quaternäre Gruppen fand *Klein*: bei der „Auflösung“ (I B 3 f) der allgemeinen $f_6 = 0$ resp. $f_7 = 0$ mit liniengeometrischen Hilfsmitteln eine G_{61} resp. $G_{\frac{1}{2}71}$ ¹¹¹⁾ liniengeometrisch eine $G_{32.61}$ ¹¹²⁾ eine „Erweiterung“ der G_{61} ; endlich, von den „Jacobi'schen Funktionen 3. Ordnung“ aus (II B 6 a) eine G_{25920} ¹¹³⁾ die nach *H. Maschke*¹¹⁴⁾ in einer $G_{2.25920}$ enthalten ist. *Klein*^{114 a)} leitet aus

107) Math. Ann. 17 (1880), p. 217, 359; 19 (1882), p. 529; 20 (1882), p. 487, 515; 25 (1885), p. 459. Die Koeffizienten der beiden Gleich. 7. Ord. bilden ein volles System von „Affektfunktionen“ [I B 3 b, Nr. 15, 23]. Über den Zusammenhang mit den 28 Doppeltangenten der C_4 s. *M. Noether*, Math. Ann. 15 (1879), p. 89.

108) Kjöb. Skrift. (6) 5 (1889), p. 64. Die Methode beruht auf Wiederholung von S (vgl. *Sylvester*, Par. C. R. 94 (1882), p. 55 (Anm. 71); *R. Lipschitz*, Acta math. 10 (1887), p. 137; *W. Bernbach*, Diss. Bonn 1887).

109) Math. Ann. 47 (1896), p. 531. Die Gruppe ist weiter verfolgt von *F. Gerbaldi*, Pal. Rend. 12 (1898), p. 23; Zürich. Kongr.-Verh. 1898, p. 242; Math. Ann. 50 (1898), p. 473; *L. Lachin*, Math. Ann. 51 (1898), p. 463. Auch die G_{60} und G_{168} des Textes sind einfache Gruppen, vgl. I A 6, Nr. 22.

110) Gött. Nachr. 1896, p. 199; Deutsche Math.-Ver. 5¹ (1896), p. 55.

111) Math. Ann. 28 (1887), p. 499; vgl. *F. N. Cole*, Am. J. 8 (1886), p. 265. Die $G_{\frac{1}{2}71}$ liniengeom. bei *Maschke*, Math. Ann. 36 (1890), p. 190, eine Untergruppe $G_{2.168}$ formentheor. bei dems., Chic. Congr. P. 1896 (1893), p. 175.

112) Math. Ann. 4 (1871), p. 346. Das volle System bei *Maschke*, Math. Ann. 30 (1887), p. 496. Eine Untergruppe ist die der „*Borchardt*'schen Moduln“ [II B 4 b], vgl. *W. Reichardt*, Math. Ann. 28 (1887), p. 84; das volle System bei *Maschke* l. c.

113) Math. Ann. 29 (1887), p. 157; vgl. *Reichardt* l. c. Die Gr. ist isomorph mit der der Dreiteilung der hyperell. Funktionen 1. Ordnung [II B 4 b] und mit der Gr. der Gleichung 27. Ordnung, von der die 27 Geraden einer F_3 abhängen; *C. Jordan*, Traité des substitutions, Paris 1871. Wegen des Zusammenhangs beider Probleme s. *Klein*, J. de math. (4) 4 (1888), p. 169, ausgeführt von *H. Burkhardt*, Gött. Nachr. 1892, p. 1; Math. Ann. 41 (1892), p. 313 (II B 4 b, III C 6).

114) *Maschke* stellt für beide Gruppen das volle System auf, Math. Ann. 33 (1889), p. 317.

114 a) Leipz. Abh. 1885, Nr. 4, sowie anschl. Arbeiten in den Math. Ann.

der Theorie der elliptischen Normalkurven endliche Gruppen in $\frac{p-1}{2}$ und $\frac{p+1}{2}$ Variablen her (p Primzahl).

Nach *Fuchs*¹¹⁵⁾, *A. Loewy*¹¹⁵⁾ und *E. H. Moore*¹¹⁵⁾ gehört zu jeder endlichen Gruppe von S eine „Hermite'sche“ F_2 (mit konjugierten Koeffizienten und Variablen).

Maschke^{116a)} und *Moore*^{116b)} haben endliche Gruppen arithmetisch charakterisiert.

Automorphe F_n mit willkürlichen Parametern hat *S. Maurer*¹¹⁷⁾ im Anschluss an *Aronhold* (Nr. 18) untersucht, indem er *Lie's* Behandlung „vollständiger Systeme“ (II A 6) zu den Elementarteilern in Beziehung setzt. F_n hat gewissen unabhängigen Differentialgleichungen $\sum_{\lambda, \mu} c_{\lambda \mu} \frac{\partial F}{\partial x_\lambda} x_\mu = 0$ zu genügen, wo die c ausgezeichnete Zahlensysteme sind. Wegen der Untersuchungen über endliche resp. endliche kontinuierliche Gruppen höherer eindeutiger Transformationen, sowie über automorphe Kurven und Flächen s. III C 2, 5, 9; II A 6.

6. Endlichkeit. *Cayley*¹¹⁸⁾ formuliert (Nr. 9) das von ihm bis $n=4$ incl.¹¹⁹⁾ erledigte Problem allgemein, die (ganz-rationalen) Komitanten c einer f_n durch eine endliche Anzahl von „Grundformen“³⁾ g unter ihnen ganz-rational darzustellen.

Eigenschaften des Gewichtes (Nr. 18, 23) von c führen ihn zu einem Systeme linearer diophantischer Gleichungen; unter der irrtümlichen Annahme von deren Unabhängigkeit (Nr. 8, 9) erschliesst er die Unlösbarkeit des Problems.

*Gordan*¹²⁰⁾ beweist auf einem beschwerlichen kombinatorischen

115) *Fuchs*, Berl. Ber. 1896, p. 753; Par. C. R. 113 (1896), p. 289; *Loewy*, ib. p. 168; Nova Acta Leop. 71 (1898), p. 379. Wegen des einfachen Beweises von *Moore* vgl. *Klein*, Deutsche Math.-Ver. 5¹ (1896), p. 67 [der Fall $n=2$ schon bei *Klein* s. oben bei Anm. 94]. Wegen der Datierung s. *Moore*, Math. Ann. 50 (1898), p. 214.

116 a) Math. Ann. 50 (1898), p. 220, 492; 51 (1898), p. 253 ($n=3, 4$). b) Math. Ann. 50 (1898), p. 213.

117) Münch. Ber. 1888, p. 103; auf rationale Transformationen ausgedehnt J. f. Math. 107 (1890), p. 89 [Nr. 2].

118) II. und IX. Mem., sowie wegen des fehlerhaften Schlusses VIII. Mem. und Nr. 9 Anm. 184.

119) Wegen der Formensysteme selbst vgl. etwa „Clebsch-Lindemann“¹⁾, p. 210, 228, sowie Nr. 8, Anm. 169.

120) J. f. Math. 69 (1868), p. 343. Nach *Kronecker* bilden die c einen „Integritätsbereich“, „Festschrift“ p. 14.

Wege, dass einer f_n im obigen Sinne ein „volles System“¹²¹⁾ von g zukommt; dies „Endlichkeitsproblem“, zugleich für höhere Formen, ist ein Kernpunkt der Theorie geworden. Jedes symbolische Produkt (Nr. 12) vom Grade m ist eine (numerisch) ganze lineare Kombination von Formen, die mittels Überschiebung (Nr. 14) von Formen f_{m-1} mit f gebildet sind. Greift man von diesen, für $m = 1, 2, 3, \dots$ gebildeten Überschiebungen die linear unabhängigen „ T “ heraus, durch die jede weitere Form *eindeutig* darstellbar ist, so hat man ein volles System der T nachzuweisen. Ein solches existiere für eine Urform f_{n-1} , so entspricht jeder Komitante von f_{n-1} eine solche von $f = f_n$; indem man diese, aus f_{n-1} „herübergenommenen“ Formen genügend oft über die $(f, f)_k$ überschiebt, entstehen die übrigen Komitanten von f_n , die nach dem Werte von k in Klassen zerfallen. Für jede Klasse wird die Endlichkeit bewiesen.

Der Beweis liefert aber zugleich die Mittel, die vollen Systeme zu bilden, oder wenigstens zu begrenzen. Für eine f_5 und f_6 gelingt die Reduktion auf ein „kleinstes“ System von 23 resp. 26 Grundformen g (Nr. 9).

Gordan giebt die Ausdehnung auf mehrere f ,¹²¹⁾ insbesondere im Fall der Kombinantanten¹²²⁾ (Nr. 24); auf eine C_3 ,¹²³⁾ und auf zwei C_2 .¹²⁴⁾ Besitzen zwei Formenreihen je ein volles System, so auch das „kombinierte“¹²⁵⁾, das durch Überschiebung der Formen und Formenprodukte beider Systeme entsteht. Im „Programm“¹²⁶⁾ ersetzt *Gordan* die Überschiebungen durch die allgemeineren „Faltungen“¹²⁷⁾ (Nr. 14), er führt die unsymbolischen „Reihenentwickelungen“ (Nr. 17) ein, aus deren Vergleichung Relationen zwischen symbolischen Produkten fließen.

Der Beweis für Urformen f stützt sich jetzt auf den „Hilfssatz“¹²⁸⁾, dass die positiven, ganzzahligen Lösungen eines gewissen

121) Math. Ann. 2 (1870), p. 227; ib. 5 (1872), p. 595.

122) Math. Ann. 5 (1872), p. 95.

123) Math. Ann. 1 (1869), p. 90.

124) Bei „Clebsch-Lindemann“¹¹⁾, p. 291, ausgeführt in Math. Ann. 19 (1882), p. 529 (Anm. 145).

125) Math. Ann. 5 (1872), p. 595; „Programm“ (s. Anm. 9) bes. p. 50. Weitere Anwendungen auf höhere Formen bei *F. Mertens*, Wien. Ber. 95 (1887), p. 942; 97 (1888), p. 437, 519; 98 (1889), p. 691; 99 (1890), p. 367; Monatsh. f. Math. 1 (1890), p. 13, sowie bei *J. Kleiber*, Zeitschr. Math. Phys. 37 (1892), p. 79.

126) S. die Monographien.

127) Vgl. auch die Hilfsbegriffe „Stufe, Rang, Dimension“, „Programm“ p. 3—6.

128) Die Bezeichnung des Textes ist der Kürze halber eingeführt. Wegen des Beweises s. „Gordan“ 1 § 15 und *J. Petersen* Nr. 12, Anm. 243.

Systems linearer diophantischer Gleichungen aus einer endlichen Anzahl von ihnen linear komponiert werden. Die für eine f_7 und f_8 angegebenen vollen Systeme hat *A. v. Gall*¹²⁹⁾ reduziert.

Der Beweis bei „Gordan“¹³⁰⁾ wird durch neue Begriffe vereinfacht. Ein „relativ vollständiges“ System geht durch Faltung in sich über mod. $(ab)^k$, d. h. bis auf Glieder, die mit $(ab)^k$ (Nr. 12) multipliziert sind. Ein „Reduzent“ ist ein symbolisches Produkt, dessen Reduzierbarkeit auf Bildungen niedrigeren Charakters abgelesen werden kann. Da sich eine Komitante c von $f = f_n$ so schreiben lässt, dass die höchste Potenz von (ab) eine gerade ist, so ordne man alle Formen von f in $g + 1$ ($g = \frac{n}{2}$ resp. $\frac{n-1}{2}$) Klassen $A_0 = f, A_1, A_2, \dots A_g$ ein, so, dass A_k mod. $(ab)^{2k+2}$ relativ vollständig ist.

Man konstruiere mittels der $(f, f)_{2k+2}$ endliche Systeme $B_0, B_1, \dots B_{g-1}$, sodass B_k relativ vollständig mod. $(ab)^{2k+4}$ ist, und A_{k+1} durch Überschiebung von A_k mit B_k entsteht. So ergibt sich successive die Endlichkeit von $A_1, A_2, \dots A_g$, wo A_g alle Komitanten von f umfasst¹³¹⁾.

Der Beweis ist vermöge der „Reihenentwicklung“ (Nr. 17) auf Urformen mit kongredienten Variablenreihen übertragbar.

*G. Peano*¹³²⁾ beweist durch vollständige Induktion, auf Grund der Reihenentwicklung nach Polaren (Nr. 14), die Endlichkeit für Urformen f, g, \dots von m Reihen von Variablen $x_1, x_2; y_1, y_2; \text{etc.}$, die unabhängigen S unterworfen werden. Insbesondere gilt der Satz von den „Korrespondenzen“¹³³⁾ $f(x_1, x_2; y_1, y_2)$.

*Gordan*¹³⁴⁾ führt den Beweis auf Grund des „erweiterten“ Formensystems, das man erhält, etwa im Falle einer f_n , wenn man das volle

129) *Math. Ann.* 17 (1880), p. 31, 139, 456; 31 (1888), p. 318.

130) „Gordan“ 2, § 20, 21. Eine Ausdehnung des Beweises auf höhere Formen (C_n, F_n, \dots) scheitert daran, dass die symbolischen Ausdrücke der Komitanten unüberschaubar werden. Vgl. *Study*, Leipz. Ber. 1890, p. 172. *E. Waelsch* hat mit Erfolg *Grassmann'sche* Symbole (*Math. Ann.* 7 [1874], p. 538) [Nr. 12] eingeführt: *Math. Ann.* 37 (1890), p. 141.

131) Excl. $n = 4$ besteht A_1 stets aus den 3 Formen $f, (f, f)_2, \{f, (f, f)_2\}$. Für $(f, f)_4 \equiv 0$, i. e. für die Formen der regulären Körper (Nr. 5) stellt A_1 , nebst noch einer Invariante, das volle System von f dar. So ist für $n = 5$ $A_0 = f, B_0 = (f, f)_2, A_1 = f, (f, f)_2, \{f, (f, f)_2\}$, während B_1 aus $(f, f)_4 = \varphi_2 = \varphi_x^2$ und $(\varphi\varphi')^2$ besteht. Die Überschiebungen von A_1 über B_1 liefern das volle System der f_5 .

132) *Tor. Atti* 17 (1881), p. 73.

133) *Gi. di mat.* 20 (1882), p. 79.

134) *Erlang. Ber.* 1887, p. 389; *Math. Ann.* 33 (1888), p. 372. Für Reihen von f_2 bereits bei *Study*, *Erl. Ber.* 1887, p. 335.

System einer beliebigen Anzahl von Formen $f_n^{(i)}$ als Überschiebungen bildet, und die Indices i, k, \dots weglässt.

*Peano*¹³⁵⁾ zeigt die Endlichkeit der „Typen“ einer beliebigen Anzahl von $f_n^{(i)}$; die Formen eines Typus erwachsen aus einander vermöge des *Aronhold'schen* Prozesses. Der Beweis beruht auf dem „Entwicklungssatz“ von *A. Capelli* (Nr. 17).

*F. Mertens*¹³⁶⁾ beweist die Endlichkeit für eine Reihe von Urformen (f_n, g_p, h_r, \dots) auf unsymbolischem Wege. Linearformen kommt ein volles System zu; ist also der Satz richtig für die Urformen $(f_{n-1}, g_p, h_r, \dots)$, so darf man sie um eine Linearform l_1 vermehren. Von den nunmehrigen Komitanten besitzen die, die in den Koeffizienten von l_1 und f_{n-1} je von gleichem Grade sind, nach *Gordan's* „Hilfssatz“ (s. oben) ein volles System. Für l_1 nehme man successive die Linearfaktoren von f_n ; durch symmetrische Kombinierung der vollen Systeme entsteht das der Ur-Reihe (f_n, g_p, h_r, \dots) . — Ähnlich verfährt *D. Hilbert*¹³⁷⁾. Sei etwa $f_n = \prod_i (\alpha_i x + \beta_i y)$ die Urform, und $\alpha_i \beta_k - \alpha_k \beta_i = \varepsilon_{ik}$, dann ist eine Invariante i von f ein Aggregat von Bildungen $\omega = \prod_{i,k} \varepsilon_{ik}^{e_{ik}}$ (e_{ik} positiv-ganz), wo $e_{i1} + \dots + e_{i,i-1} + e_{i,i+1} + \dots + e_{in}$ für $i = 1, 2, \dots, n$ den nämlichen Wert hat. Nach dem „Hilfssatz“ ist jede brauchbare Lösung e_{ik} von der Form $e_{ik} = \sum_{r=1}^{r=m} p_r e_{ik}^{(r)}$, wo die p wiederum natürliche Zahlen sind. Setzt man $e_{ik}^{(r)}$ für e_{ik} , so geht ω in eine (irrationale) Invariante ω_r über, die einer (rationalen) Gleichung von der Ordnung $n!$ genügt. $\omega_r^{p_r}$ ist darstellbar (I C 4) als lineare Form von $\omega_r^0, \omega_r^1, \dots, \omega_r^{n!-1}$; i wird eine symmetrische Summe $\sum \omega_1^{p_1} \omega_2^{p_2} \dots \omega_m^{p_m}$, und damit eine ganze Funktion einer endlichen Anzahl analoger Bildungen, für die kein $p_r > n!$ ist.

*Hilbert*¹³⁸⁾ dehnt den Endlichkeitssatz auf Reihen von Urformen

135) *Tor. Atti* 17 (1882), p. 580. Die „Typen“ hat *Clebsch* für f_1 und f_2 eingeführt, „Binäre Formen“ § 58. Die Endlichkeit der Typen der orthog. Gruppe von 3 Var. zeigt *Burkhardt*, *Math. Ann.* 43 (1893), p. 204.

136) *J. f. Math.* 100 (1886), p. 223; *Wien. Ber.* 98 (1889), p. 1. Wegen der abzählenden Beweise von *C. Jordan* und *Sylvester* s. Nr. 9, Anm. 191.

137) *Math. Ann.* 33 (1888), p. 223.

138) *Math. Ann.* 36 (1890), p. 473. Vgl. die Darstellung bei *H. Weber* 2, Abschn. 6; die arithmetischen Beweise bei *Gordan*, *Math. Ann.* 42 (1893), p. 132 und *Capelli*, *Nap. R.* (3) 2 (1896), p. 198 (nebst Erweiterung auf Potenzreihen ib. p. 231), sowie die symbolische Fassung bei *H. S. White*, *Amer. J.* 14 (1892), p. 283. Eine Anwendung auf höhere komplexe Zahlen giebt *Hilbert*, *Gött. N.*

mit n Variablen aus, vermöge Zurückführung auf einen allgemeineren Satz über unendliche Formensysteme¹³⁸⁾ [I B 1 c, Nr. 18].

Sei ein System $F_r^1(x_1, \dots, x_n | a^{(1)}), F_{r_2}^{(2)}, F_{r_3}^{(3)}, \dots$ in inf. vorgelegt, wo die a einem Rationalitätsbereiche R (I B 1 a, Nr. 9; I B 1 c, Nr. 2) angehören. Es soll jedes F aus einer endlichen Anzahl unter ihnen linear komponiert werden, mittels Faktoren, die Formen der x sind. Ist F_r eine bestimmt ausgewählte der Formen F , so lässt sich (wie beim Aufsuchen des grössten gemeinsamen Teilers [I B 1 a, Nr. 12]), eine Hilfsform B so finden, dass in $F - BF_r$ x_n^r herausfällt, also $F = BF_r + g^{(1)}x_n^{r-1} + g^{(2)}x_n^{r-2} + \dots + g^{(r)}$ wird, wo die g Formen der x_1, x_2, \dots, x_{n-1} sind, für die unser Satz richtig sei. Wendet man ihn auf die Kolonne der $g^{(1)}$ ¹³⁹⁾ an, indem F alle Systemformen durchläuft, so erscheint F als lineare Kombination von F_r , einer endlichen Anzahl weiterer $F^{(i)}$ und einer Form, die bez. x_n von einer Ordnung $\leq r - 2$ ist. So gelangt man nach höchstens r Schritten zur Darstellung: $F + A^{(1)}F^{(1)} + A^{(2)}F^{(2)} + \dots + A^{(m)}F^{(m)}$, wo die $F^{(i)}$ m geeignete Systemformen sind, und wo die Koeffizienten der $A^{(i)}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ R angehören. Für $n = 1$ ist aber der Satz trivial. — Behufs Anwendung auf die Invarianten liege etwa eine ternäre Urform $C(x|a)$ vor. Die Invarianten J , als Formen der a , lassen sich in einer Reihe, wie die $F^{(i)}$, anordnen, sodass jedes J die Darstellung $J = \sum_1^m A^{(k)}J_k$ gewinnt.

Die $A(a)$ sind noch durch Invarianten zu ersetzen. Seien J vom Grade g in den a , $J^{(k)}$ vom Grade g_k ; die Gewichte p, p_k . Durch eine S mit dem Modul Δ gehe $C(x|a)$ über in $C'(x'|a')$, dann folgt (Nr. 2) $\Delta^g J = \sum_1^m \Delta^{g_k} A^{(k)}(a') J^{(k)}$. Nach *Gordan*¹⁴⁰⁾ und *Mertens*¹⁴⁰⁾ unterwerfe man beide Seiten der Gleichung g -mal dem Ω -Prozess

$\sum \pm \left| \frac{\partial}{\partial a_{11}} \frac{\partial}{\partial a_{22}} \frac{\partial}{\partial a_{33}} \right|$ (Nr. 14), so ändert sich J nur um einen

1896, p. 179. Aus *Hilbert's* Satz folgt u. a., dass zu jeder endlichen Gruppe von S ein volles System von Invar. gehört (Nr. 5). *Kronecker* hat einen analogen Satz, *Festschrift* p. 18, aber für assoziierte Systeme (Nr. 7). — *L. Maurer* beweist, dass die charakt. linearen part. Diff.gleichungen (Nr. 5, 18) der J umgekehrt deren „Endlichkeit“ involvieren: *Münch. Ber.* 29 (1899), p. 147.

139) Der Prozess lässt sich auch in umgekehrter Richtung vornehmen, wodurch Nenner vermieden werden, sodass nur ganze ganzzahlige Verbindungen der Koeffizienten eingehen. In diesem Sinne hat *Weber* für die f_i ein volles System aufgestellt, *Gött. Nachr.* 1893, p. 108. Cf. „*Weber*“ 1, Abschn. 5.

140) *Gordan* für $q = 0$ in „*Gordan*“ 2, § 9; *Mertens* allg. in *Wien. Ber.* 95 (1887), p. 942. Für Urformen F_1 schon bei *Clebsch*, *J. f. Math.* 59 (1861), p. 7 u. f. Derartige Differentiationsprozesse ausführlich bei *W. E. Story*, *Lond. M. S. Pr.* 23 (1892), p. 267; *Math. Ann.* 41 (1893), p. 469.

positiv-ganzzahligen Faktor, während jeder Faktor von $J^{(k)}$ eine Invariante $J'^{(k)}$ von C wird, mithin ist (von Zahlenfaktoren abgesehen)

$J = \sum_1^m J'^{(k)} J^{(k)}$, wo die Grade und Gewichte der J' unter denen von J liegen. Durch analoge Darstellung der J' u. s. f. gelangt man nach einer endlichen Anzahl von Schritten zu einem vollen Systeme von Invarianten $J^{(1)}, J^{(2)}, \dots J^{(n)}$.¹⁴¹⁾ Der Beweis gilt ebenso für eine Reihe von Urformen $F(x; y; \dots | a)$ von Variablenreihen, $(x), (y), \dots$, mögen sie denselben, oder auch unabhängigen S unterliegen.

Die linken Seiten („Syzyganten“) der in den a identisch erfüllten Relationen („Syzygien 1. Art“ [Nr. 8]) zwischen den J sind (nicht homogene) Formen der Grundformen $J^{(1)}, J^{(k)}, \dots J^{(n)}$; auch sie besitzen demnach ein volles System. Zwischen den Syzygien 1. Art herrschen in den $J^{(k)}$ identisch erfüllte Relationen („Syzygien 2. Art“) u. s. f. Allen diesen „Syzyganten“ kommt je ein volles System zu, der Prozess der Syzygienbildung bricht aber auch nach höchstens m Schritten ab.¹⁴²⁾

Behufs wirklicher Aufstellung voller Systeme beachte man¹⁴³⁾, dass sich aus den J einer Reihe von F eine endliche Anzahl σ algebraisch unabhängiger $J^{(1)}, J^{(2)}, \dots J^{(\sigma)}$ so aussondern lässt, dass alle übrigen ganze algebraische Funktionen (I B 1 c, Nr. 3) der σ Formen J werden, d. i. zugleich mit den J verschwinden. Durch die J wird ein „Körper“ (I B 1 c, Nr. 2; I C 4) bestimmt, dessen „Basis“ $i^{(1)}, i^{(2)}, \dots i^{(k)}$ sich nach *Kronecker*¹⁴⁴⁾ auf arithmetischem Wege finden lässt; dann aber bilden die J mit den i ein volles System.

Für eine einzelne f_n kann man die J durch Resultantenbildung erhalten, und dann vermöge des *Aronhold*'schen Prozesses (Nr. 13) auf eine Reihe von f übergehen.

Aber auch für $F(x_1, x_2, \dots x_n | a)$ lassen sich die J durch eine endliche Anzahl rationaler Prozesse gewinnen; das beruht darauf, dass eine $F(x | a)$ mit numerischen a , die vermöge einer S mit dem Modul Δ in $F'(x' | a')$ übergehe, dann und nur dann noch eine $J (\neq 0)$ besitzt, wenn Δ eine ganze algebraische Funktion der a' ist.

141) *Hurwitz* hat mit Erfolg einen Integrationsprozess eingeführt, Gött. Nachr. 1897, p. 71 und hat damit zuerst die Endlichkeit der orthogonalen Invarianten einer Reihe von Urformen allgemein nachgewiesen. Wegen der systematischen Stellung dieser „Integralinvarianten“ vgl. *S. Lie*, Leipz. Ber. 49 (1897), p. 342, 367.

142) Ein Beispiel bei *A. Schönflies*, Gött. Nachr. 1891, p. 339.

143) *Math. Ann.* 42 (1893), p. 313. Einen Selbstbericht giebt *Hilbert*, Chic. Congr. P. 1896 (1893), p. 116; vgl. ferner den Bericht von *H. S. White*, N. York B. (2) 5 (1899), p. 161.

144) *J. f. Math.* 92 (= Festschrift) 1881, § 6.

Daraufhin lassen sich auch nur von n abhängige obere Grenzen für Anzahl und Gewicht der Grundformen auf rationalem Wege ermitteln¹⁴⁵⁾.

7. Associierte Formen und typische Darstellung. *Hermite*¹⁴⁶⁾ hat die Komitanten einer f_n durch eine endliche Anzahl unter ihnen, die „associierten Formen“, *rational* ausgedrückt. Führt man in $f(x) = f_n(x_1, x_2)$ die Kovarianten $\xi_1 = y_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} + y_2 \frac{\partial f}{\partial x_2}$, $\xi_2 = x_1 y_2 - x_2 y_1$ — wo die y mit den x kogredient sind — als neue Variable ein, wodurch $f^{n-1}(x)f(y)$ übergeht in $\varphi(\xi) = (1, 0, \varphi^{(2)}, \varphi^{(3)}, \dots, \varphi^{(n)})(\xi_1, \xi_2)^n$, so bilden die $\varphi^{(2)}, \varphi^{(3)}, \dots, \varphi^{(n)}$ nebst f nach Sätzen von *Boole* und *Sylvester* (Nr. 2, 16) ein associiertes System von f . Ersetzt man im Leitgliede (Nr. 23) einer Komitante c von f die Koeffizienten von $f(x)$ durch die von $\varphi(\xi)$, und macht mit f homogen, so hat man c durch f und die $\varphi^{(i)}$ rational dargestellt. Als Anwendung erscheint *Cayley's* Syzygie (Nr. 8) zwischen den Formen einer f_4 , die wiederum zu einer „typischen“ (s. unten) Transformation des elliptischen Integrals erster Gattung verwandt wird.

*Hermite*¹⁴⁷⁾ setzt auch die „Tschirnhausentransformation“ von $f=0$

145) Wegen der vielen Einzeluntersuchungen über volle Systeme vgl. „Inv.-Bericht“ II A 6, p. 150. Nachträge: Das System von $2C_2$ (Anm. 124) leitet einfach *K. Reuschle* ab, Zürich. Congr.-Verh. 1898, p. 123; durch Eliminationen aus den *Euler'schen* Formeln [I B 1 a, Nr. 27] für die Diff.quotienten von Formen erhält er Komitanten incl. ihrer Syzygien. — Das System von $3f_3$ bei *v. Gall*, Math. Ann. 45 (1894), p. 207. Die Systeme der f_5, f_6 übersichtlich bei *E. McClintock*, N. York. B. 1 (1892), p. 85. Die f_5 mittels einer typischen Darstellung [Nr. 7] bei *J. Hammond*, Lond. M. S. P. 27 (1896), p. 392; vgl. *Cayley*, X. Mem. Das System von $3C_2$ auch bei *H. F. Baker*, Cambr. Tr. 15¹ (1889), p. 62 und, nach der Methode von *Mertens*, bei *E. Fischer* und *K. Mumelter*, Monatsh. f. Math. u. Phys. 8 (1897), p. 97. — Bes. sei noch auf eine Arbeit von *Study*, Leipz. Ber. 49 (1897), p. 443 hingewiesen, der das System der ganzen Invarianten der Gruppe von S , die eine F_2 ($D \neq 0$) in ein Vielfaches von F_2 überführen [Nr. 3, Anm. 77], in den Grundzügen behandelt. St. präzisiert hier auch die Stellung derartiger „spezieller“ Probleme zur allgemeinen Theorie von *Lie*.

146) J. f. Math. 52 (1856), p. 1; das Wort „associiert“ p. 23. Die φ sind die „Schwesterformen“, vgl. „Gordan“ 2, § 34, s. noch Anm. 148, 149, 151. Eine andere Begründung bei *B. Igel*, „Über die associierten Formen“, Wien 1889. Ausdehnungen auf n Variable bei *Brioschi*, Ann. di mat. (1) 1 (1858), p. 158; *H. Grassmann*, Math. Ann. 7 (1874), p. 538, wo auch der Zusammenhang mit dem Satze der Nr. 15 hervortritt. Für $n=3$ ausführlicher bei *W. E. Brumfate*, Quart. J. 25 (1891), p. 155. Die Subst. von *Hermite* dient bei *Brioschi* zur Kanonisierung des hyperelliptischen Integrals 1. Gattung, Rom. Linc. R. (5), 4¹ (1895), p. 363. S. die historische Darstellung bei *M. Noether*, Math. Ann. 50 (1878), p. 477. — *Deruyts* hat die vollen und associierten Systeme auf seine „primären Kovarianten“ übertragen [Nr. 23].

147) Par. C. R. 46 (1858), p. 961; vgl. *Cayley*, J. f. Math. 58 (1861), p. 259

(I B 3 f) in invariante Gestalt um, sodass zugleich der invariante Charakter der transformierten Gleichung $\psi = 0$ — die überdies von möglichst wenigen Parametern abhängen soll — hervortritt. Ist $\varphi(\xi) = \frac{f(\xi)}{\xi - \alpha}$, wo $f(\alpha) = 0$, so schreibt *Hermite* die α zugeordnete Wurzel von ψ symbolisch $\varphi(\xi) - \frac{1}{n} f'(\xi)$, wo $\xi^0, \xi^1, \dots, \xi^{n-2}$ durch $n - 1$ Parameter t zu ersetzen sind.

Die Koeffizienten ψ werden Polarenbildungen von Kovarianten von f ; der zweite ist $= 0$, der dritte die „Bezoutiante“ [I B 3 a, Nr. 8]. Die neuen Koeffizienten werden von möglichst geringem Grade in den alten. *Clebsch*¹⁴⁸⁾ führt die „Schwesterformen“ $\varphi^{(k)}$ zurück auf die $\psi^{(k)} = (f, f)_k$ und $\chi^{(k)} = (f, \psi^{(k)})_1$; er zeigt in einfachen Fällen, *S. Gundelfinger*¹⁴⁹⁾ allgemein, dass die $\varphi^{(k)}$ in den ψ , χ und in f ganz sind, und dehnt die associierte Darstellung auf zwei, *Sylvester*¹⁵⁰⁾ auf beliebig viele f aus.

*Gordan*¹⁵¹⁾ führt die gemeinte Darstellung der φ explicite aus; die ψ , χ treten in a priori angebbaren Produkten auf; deren numerische Koeffizienten C hängen von quadratischen Gleichungen ab, die aber in in den C linear überführbar sind. *S. Kohn*¹⁵²⁾ operiert anstatt der $\varphi^{(k)}$ mit den Wurzeln von $\varphi(\xi, 1) = 0$ und findet so die Teilbarkeit (Nr. 25) der Resultanten und Diskriminanten von Kovarianten von f durch eine Potenz der Diskriminante von f , und entsprechend für mehrere Urformen.

*R. Perrin*¹⁵³⁾ hat für $F_n(x_1, x_2, \dots, x_p)$ ein associiertes System konstruiert. Sei $F = (a, F_1, F_2, \dots, F_n)(x_1, 1)^n = f(x_1, 1)$, so bilde man die $\psi^{(k)}, \chi^{(k)}$ für f , deren Leitglieder $\psi_0^{(k)}, \chi_0^{(k)}$ Formen der x_2, x_3, \dots, x_p sind. Ist in gleichem Sinne C_0 das Leitglied einer Kovariante C von F , so wird C_0 , bis auf eine Potenz von a im Nenner, ganz-rational in Komitanten der ψ_0, χ_0 . Von C_0 kann man zu C zurückkehren. Das Prinzip des Beweises reicht hin für die Kontravarianten von F , sowie für mehrere Urformen.

= Coll. Pap. 4, p. 259, sowie die Darstellung bei „Weber“ 1, Abschn. 6, 7 und Nr. 19, Anm. 321. Die Bezoutiante ist von *Sylvester* genauer untersucht, Lond. Tr. 143 (1853), p. 543 [I B 3 a, Nr. 8].

148) Gött. Nachr. 1870, p. 405 = Math. Ann. 3, p. 265.

149) J. f. Math. 74 (1871), p. 87; einfacher bei „Salmon-Fiedler“ p. 87. Vgl. *B. Igel*, Monatsh. f. Math. u. Phys. 5 (1894), p. 287.

150) Par. C. R. 86 (1878), p. 448; Amer. J. 1 (1878), p. 118.

151) Math. Ann. 41 (1892), p. 1.

152) Wien. Ber. 100 (1851), p. 865, 1013; vgl. *E. Waelsch*, ib. p. 574. Der Ausdruck für die Wurzeln von $\varphi = 0$ implicite schon bei *Hermite* (s. Anm. 147).

153) Par. C. R. 104 (1888), p. 108, 220, 280.

Weiter reicht die Methode von *R. Forsyth*¹⁵⁴⁾. Es liege etwa eine (ternäre) C_n vor, $= (a, f_1, f_2, \dots, f_n) (x_1, 1)^n$; $T_{n,p} = T(x; u) = T_{00} x_1^m u_1^p + \dots$ sei eine Komitante („Ternariante“) von C . Dann genügt das Leitglied T_{00} von T zwei charakteristischen linearen partiellen Differentialgleichungen [Nr. 18], die aussagen, dass T_{00} zugleich das Leitglied einer Simultankovariante der f_i ist. Das assoziierte System von C besteht, incl. u_x , aus $\frac{1}{2} (n+4)(n-1) + 1$ Individuen, für die allgemeinere Urform $C(x; u)$ aus $\frac{1}{4} (n+1)(n+2)(\nu+1)(\nu+2) - 2$.

Bei $F(x_1, x_2, x_3, x_4)$ sind noch die „Zwischenvariablen“ $p_{ik} = x_i y_k - x_k y_i$ zu berücksichtigen. Das Leitglied Q_{000} einer „Quaternariante“ Q von F genügt jetzt sechs charakteristischen Gleichungen u. s. f.

Von Einzelfällen höherer Gebiete haben durchgeführt *Clebsch* und *Gordan*¹⁵⁵⁾ die C_3 , *Gordan*¹⁵⁶⁾ die C_4 mit einer G_{168} in sich (Nr. 5).

Der associierten „Kovariantentypik“ gegenüber steht die Methode der „(Invarianten-)Typik“, in $i^k f$ (wo i eine Invariante von f) vermöge einer kovarianten Tschirnhausentransformation die Koeffizienten zu Invarianten zu machen.

Zuerst bringt *Hermite*¹⁵⁷⁾ durch Einführung zweier linearer Kovarianten c_1, c_1' von f_n als neuer Variablen f_n auf eine typische Gestalt f_n' . Ursprünglich sind bei *Hermite* c_1, c_1' irrational, die Faktoren einer rationalen Kovariante c_2 ; f_n' nimmt eine „kanonische“ Gestalt an, und erst jede ganze Funktion ihrer Koeffizienten, die bei den S unverändert bleibt, die c_2 in sich überführen, wird, bis auf eine Potenz der Diskriminante von c_2 im Nenner, eine ganz-rationale Invariante von f_n . Im weiteren Verlaufe werden zwei rationale c_1, c_1' verwandt (n ungerade); f_n' wird zur „typischen Form“. Der Fall $n = 5$ wird durchgeführt; die schiefe Invariante (Nr. 2) von f_5 wird durch die drei andern ausgedrückt. *Hermite* gelangt so zu einer invariantentheoretischen „Auflösung“ der $f_5 = 0$ und zu Kriterien für die Realitätsverhältnisse¹⁵⁸⁾ der Wurzeln. *Clebsch* und *Gordan*¹⁵⁹⁾ umgehen die

154) Amer. J. 12 (1889), p. 1, 115 („Ternarianten“), vgl. *W. E. Bruns*, Quart. J. 25 (1891), p. 155; Cambr. Tr. 14 (1889), p. 409 („Quaternarianten“) [Ann. 228]. Weitere Ausführungen, bes. für $F_3(x_1 x_2 x_3 x_4)$, bei *D. B. Mair*, Cambr. Tr. 16 (1896), p. 1.

155) Math. Ann. 1 (1869), p. 57; vgl. *Forsyth*, Ann. 154.

156) Math. Ann. 17 (1880), p. 359; vgl. die Vorarbeit Ann. 155.

157) Cambr. Publ. m. J. 9 (1854), p. 172.

158) Vgl. die Übersicht bei *Klein*, „Kosaeder“, Abschn. 2, sowie *J. McMahon* bei *R. A. Harris*, Ann. of math. 5 (1891), p. 217.

159) Ann. di mat. (2) 1 (1867), p. 23; vgl. „Gordan“ 2, § 24, 29.

direkte Einführung der c_1, c_1' durch symbolische Rechnung (Nr. 12). Es liege etwa eine $f_5 = a_x^5$ vor, und seien α_x, β_x zunächst überhaupt zwei Linearformen, so ist $(\alpha\beta)\alpha_x \equiv (\alpha\beta)\alpha_x - (b\alpha)\beta_x$. Erhebt man auf die 5^{te} Potenz, so ist $(\alpha\beta)^5 f_5$ als Form der Variabeln α_x, β_x dargestellt; man hat noch die Koeffizienten als simultane Invarianten von f, α_x, β_x auszudrücken. Hinterher nehme man für α_x, β_x zwei geeignete Kovarianten von f_5 . Es lassen sich so auch alle Ausnahmefälle der f_5 erledigen. — Für $f = f_6 = a_x^6 = (a_x^2)^3$ wird mit drei Quadratformen $\alpha_x^2, \beta_x^2, \gamma_x^2$ entsprechend operiert; $(\alpha\beta\gamma)\alpha_x^2$ wird linear in $\alpha_x^2, \beta_x^2, \gamma_x^2$ und $(\alpha\beta\gamma)^3 f_6$ zu einer typischen $C_3(\alpha_x^2, \beta_x^2, \gamma_x^2)$ u. s. f. Analog wird eine f_{2n} eine $C_n(\alpha_x^2, \beta_x^2, \gamma_x^2)$. Die Form C_n lässt sich nach *F. Lindemann*¹⁶⁰⁾ durch das identische Verschwinden einer gewissen Kovariante charakterisieren; hier ist eine Quelle der Apolaritätstheorie (Nr. 24).

Einzelfälle: $2f_3$ als Ableitungen einer f_4 bei *Hermite*¹⁶¹⁾, durch *Clebsch*¹⁶²⁾ und einfacher durch *Gundelfinger*¹⁶³⁾ ausgeführt; $3f_4$ als Ableitungen einer f_6 nach *Lindemann*¹⁶⁴⁾; $3C_2$ als Ableitungen einer C_3 bei *Hermite*¹⁶¹⁾, von *Gundelfinger*¹⁶⁵⁾ durchgeführt und auf die Transformation eines längs einer C_3 erstreckten elliptischen Integrals 1. Gattung angewendet¹⁶⁶⁾; endlich die C_4 mit einer G_{168} in sich (Nr. 5), zusammen mit einer C_2 bei *Gordan*¹⁶⁷⁾.

Vermöge typischer Darstellung werden nach *E. Stroh*¹⁶⁸⁾ die Kombinanten (Nr. 24) von f_n, φ_n zu Komitanten einer $f_{2(n-1)}$.

8. Syzygien. Zwischen den Grundformen g von Urformen bestehen rationale Relationen, „Syzygien“ (1. Art), [Nr. 6]. Seien etwa $g_1 = g_1(x_1, x_2)$, $g_2 = g_2(x_1, x_2)$, $g_3 = g_3(x_1, x_2)$ drei Grundformen einer f_n , so führt die Elimination der x_1, x_2 zu einer Syzygie zwischen g_1, g_2, g_3 .

160) Par. Bull. S. M. 5 (1877), p. 113; 6 (1878), p. 195.

161) J. f. Math. 57 (1860), p. 371.

162) J. f. Math. 67 (1867), p. 371.

163) Math. Ann. 7 (1874), p. 452, s. die Verallgemeinerungen bei *F. de Astis*, Gi. di mat. 36 (1898), p. 161; $2f_n$ bei *Ph. Wiederhold*, ib. 8 (1875), p. 444.

164) „Clebsch-Lindemann“ 1, p. 900.

165) J. f. Math. 80 (1875), p. 73. Allgemeiner hat *J. Rosanes* 3 $F_{1,1} (n=3)$ durch eine S zugleich in symmetrische Formen übergeführt, J. f. Math. 95 (1887), p. 247; vgl. *Igel*, Monatsh. f. Math. 5 (1894), p. 284, sowie die Ergänzungen bei *Ph. Maennchen*, Diss. Giessen 1898.

166) Math. Ann. 7 (1874), p. 449. Vgl. die Weiterführung bei *G. Pittarelli*, Rom. Linc. Rend. (4) 4 (1888), p. 509, 703.

167) Math. Ann. 20 (1882), p. 529.

168) Math. Ann. 34 (1889), p. 321.

Bei einer f_3 wie f_4 existiert nur eine Syzygie, vermöge deren Cayley¹⁶⁹⁾ die $f_3 = 0$ resp. $f_4 = 0$ „invariantentheoretisch auflöst“. Die associierten Formen (Nr. 7) liefern eine theoretische Herstellung der Syzygien zwischen den Komitanten von Urformen; man drücke die Grundformen durch die associierten aus und eliminiere letztere.

So haben Cayley¹⁷⁰⁾ und Brioschi¹⁷¹⁾ die f_5 behandelt. Cyp. Stéphanos¹⁷²⁾ legt einen Satz von Clebsch¹⁷³⁾ zu Grunde: von einer (endlichen) Reihe von Formen $f^{(1)}, f^{(2)}, \dots$ bilde man die $(f^{(i)}, f^{(k)})_1 = g_{ik}$, dann sind die Produkte je zweier g , wie auch die $(f^{(i)}, g_{ik})_1$ zurückführbar auf die g und die $(f^{(i)}, f^{(k)})_2$. So bestehen die (26) Grundformen einer f_6 aus 5 Invarianten, 8 geraden Kovarianten c und 13 schiefen c' ; die c' sind ersetzbar durch 13 von den 28 $(c^{(i)}, c^{(k)})_1$,

169) V. Mem. Vgl. etwa die Darstellung bei „Clebsch-Lindemann“ 1, p. 210, 228; übersichtlicher, unter wesentlicher Zugrundelegung irrationaler Komitanten, mit Anwendungen auf elliptische Integrale, bei Study, Amer. J. 17 (1895), p. 185, 216. Über den prinzipiellen Wert derartiger Auflösungen s. „Invariantenber.“, p. 92. — Bei der $f_3 = f$ giebt es 4 Grundformen: $f, h_2 = h = (f, f)_2, q_3 = q = (f, h)_1, \delta_0 = \delta = (h, h)_2$. Die Syzygie ist: $-\frac{h^3}{2} = q^2 + \frac{\delta}{2} f^2$. Zerlegt man rechts in $\left(q + f\sqrt{-\frac{\delta}{2}}\right)\left(q - f\sqrt{-\frac{\delta}{2}}\right)$, sowie h in $2\xi\eta$, so folgt durch Vergleichung $2\xi^3 = q + f\sqrt{-\frac{\delta}{2}}, 2\eta^3 = q - f\sqrt{-\frac{\delta}{2}}$, also $f\sqrt{-\frac{\delta}{2}} = \xi^3 - \eta^3$, und damit $f = \frac{1}{\sqrt{-\frac{\delta}{2}}} (\xi - \eta) (\xi - \varepsilon\eta) (\xi - \varepsilon^2\eta)$. — Im

Falle der $f_4 = f$ existieren 5 Grundformen: $f, h_4 = h = (f, f)_2, \vartheta_6 = \vartheta = (f, h)_1, i_0 = i = (f, f)_4, j_0 = j = (f, h)_4$. Die Syzygie lautet: $-2\vartheta^2 = h^3 - \frac{1}{2}ihf^2 + \frac{1}{3}jf^3$. Man zerlege rechts in $(h + m_1f)(h + m_2f)(h + m_3f)$, links denke man sich ϑ gespalten in $-2\varphi_2\psi_2\chi_2$, so folgt durch Vergleichung $H + m_1f = -2\varphi^2, H + m_2f = -2\psi^2, H + m_3f = -2\chi^2$, und hieraus $f = 2\frac{\chi^2 - \psi^2}{m_2 - m_3} = 2\frac{\psi^2 - \varphi^2}{m_1 - m_2} = 2\frac{\varphi^2 - \chi^2}{m_3 - m_1}$. Im Übrigen s. Study l. c., und für f_4 noch S. White, N. Y. B. (2) 3, p. 250.

170) II., III., V., VIII., X. Mem. Die Liste der Syzygien geht bis zum Grade 14 incl.; weitere Ergänzungen bei Sylvester, Amer. J. 4 (1881), p. 41; J. Hammond, ib. 8 (1885), p. 19.

171) Ann. di mat. (2) 11 (1883), p. 291, mit Anwendungen auf kanonische Gestalten der f_5 und f_6 ; auf C_n ib. 15 (1887), p. 235.

172) Par. C. R. 96 (1883), p. 232, 1564.

173) „Clebsch“ § 54, vgl. „Gordan“ 2, § 4, mit Anwendung auf die Syzygien einer Reihe von f_2 : § 11, 12. Erweiterungen des Satzes von Clebsch bei: E. d'Ovidio, Tor. A. 14 (1879), p. 963; C. le Paige, Belg. Bull. (2) 49 (1880), p. 113; (3) 1 (1881), p. 480; Par. C. R. 92 (1881), p. 688; G. Torelli, Nap. Rend. 25 (1886), p. 125.

während die 15 übrigen durch die Grundformen darstellbar sind. Auf diese 15 Darstellungen wird das Verfahren von *Clebsch* angewandt. — *v. Gall*¹⁷⁴⁾ verknüpft diese Methode mit dem *Aronhold'schen* Prozesse (Nr. 13), und vermag so auch die nicht auf einfachere zurückführbaren „irreducibeln“ oder „Grundszygien“ herauszuschälen. Die Fälle der f_6 , zwei f_3 , zwei f_4 werden eingehend verfolgt.

*R. Perrin*¹⁷⁵⁾ vereinfacht die Syzygien einer $f_n = (\alpha_0, \dots)(x_1, x_2)^n$. Man ersetze in jeder Syzygie jede Komitante c durch ihr Leitglied c_0 (Nr. 23), und c_0 weiter durch das „Residuum“ c_{00} , das aus c_0 für $\alpha_0 = 0$ entsteht; diese verkürzte Darstellung der Syzygien ist immer noch eine eindeutige, da c_0 durch c_{00} bestimmt ist. — *E. Stroh*¹⁷⁶⁾ eröffnet eine systematische Einsicht in den Kreis der (binären) Syzygien. Für 4 Formen f, g, h, k gelten (Nr. 14) die Überschiebungs-Identitäten ($i = 1, 2, 3, \dots$):

$$[f, g, h, k]_i = \sum_{\lambda=0}^i \binom{i}{\lambda} (f, g)_\lambda (h, k)_{i-\lambda} - \sum_{\lambda=0}^i \binom{i}{\lambda} (f, k)_\lambda (h, g)_{i-\lambda} = 0,$$

die sich bei den 24 Vertauschungen der Formen auf 3 allgemeine Typen reduzieren; einige weitere entstehen durch Spezialisierung. Man hat nur noch die Grundformen als Überschiebungen einer kleinsten Anzahl unter ihnen darzustellen. So fließen für eine f_6 aus einer Quelle die den 20 associierten Formen parallel laufenden 20 „fundamentalen“ Syzygien: die linke Seite jeder weiteren Syzygie — Syzygante — ist, bis auf eine Potenz von f_6 , eine lineare Kombination jener, mit Grundformen als Faktoren. Alle bis dahin entdeckten (204) Syzygien der f_6 ordnen sich unter 11 Typen unter und lassen sich unabhängig von einander berechnen.

Ein „volles System“ (Nr. 6) von „Grundszyzyganten“ ist freilich auch damit noch nicht gewonnen. Die experimentierenden, aber nicht allgemein gültigen Methoden, wie sie besonders die englische Schule ausbildete, dürfen wir übergehen¹⁷⁷⁾ (Nr. 9). Für höhere als binäre

174) *Math. Ann.* 31 (1888), p. 424 ($2f_3$); 33 (1888), p. 197; 34 (1889), p. 332, 43 (1893), p. 550 ($2f_4$); 35 (1889), p. 63 (f_6). Für f_6 vgl. noch *E. d'Ovidio*, *Pal. R.* 7 (1893), p. 1; *Tor. A.* 28 (1893), p. 447. Bei $2f_4$ verwendet *Brioschi* eine Grundszygyzie zur Darst. der Resultante; *Tor. A.* 31 (1896), p. 441 [Nr. 25]. Die f_8 behandelt ausführlich *R. Alagna*, *Pal. R.* 10 (1896), p. 41.

175) *Par. S. M. Bull.* 11 (1883), p. 88; *Par. C. R.* 96 (1883), p. 426, 479, 563, 1717, 1776, 1842. Wegen der Methode s. *Sylvester*, *Amer. J.* 5 (1882), p. 79.

176) *Math. Ann.* 33 (1888), p. 61; vgl. noch 31 (1888), p. 444; 34 (1890), p. 306, 354; 36 (1890), p. 262.

177) Vgl. „*Inv.-Ber.*“ 2 A d., p. 163. Syzygien zwischen „Perpetuanten“ bei *P. A. Mac Mahon*, *Amer. J.* 10 (1887), p. 149. — Über Syzygien in der Trigo-

Urformen sind erst Ansätze da (s. *Stroh*, Math. Ann. 36 I. c. Schluss).

9. Abzählende Richtung. *Cayley*¹⁷⁸⁾ behandelt das Problem, für eine Urform $f_i(x|a)$ die Anzahl der linear unabhängigen („asyzygetischen“) Komitanten, deren Grad j und Ordnung g vorgegeben sind, zu ermitteln. Eine Kovariante c von f_i ist durch ihr Leitglied φ (Nr. 2, 23) ersetzbar, während eine Invariante ihr eigenes Leitglied φ ist; φ genügt der charakteristischen Differentialgleichung [I B 3 b, Nr. 8]:

$$\delta\varphi \equiv \sum_{k=0}^{k=i} k a_{k-1} \frac{\partial\varphi}{\partial a_k} = 0 \quad (\text{Nr. 18}).$$

Führt man noch die „Gewichtszahl“ $w = \frac{1}{2}(ij - g)$ (Nr. 2, 18, 23) ein, und bezeichnet die Anzahl der Koeffizienten von φ mit $(w; i, j)$, so stellt sich die der Koeffizienten von $\delta\varphi$ als $(w - 1; i, j)$ heraus. Die Koeffizienten von $\delta\varphi$ sind, wie *Cayley* annahm, *Sylvester*¹⁷⁹⁾ später bewies, linear unabhängig. Dann existieren, bei gegebenen i, j, w , $\Delta(w; i, j) = (w; i, j) - (w - 1; i, j)$ asyzygetische Komitanten von f_i . — Ist const. $a_0^{\alpha_0} a_1^{\alpha_1} a_2^{\alpha_2} \dots a_i^{\alpha_i}$ ein Term von φ , so sind j und w definiert durch: (Nr. 2, 18, 23) $j = \alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_i$, $w = \alpha_1 + 2\alpha_2 + \dots + i\alpha_i$; $(w; i, j)$ giebt danach an, wie oft w als Summe von j Zahlen der Reihe $0, 1, \dots, i$ mit Wiederholungen gebildet werden kann, und ist nach *L. Euler*¹⁸⁰⁾ der Koeffizient von $x^w z^j$ in der Entwicklung der „erzeugenden Funktion“ $1/(1-z)(1-xz)(1-x^2z)\dots(1-x^i z)$ nach steigenden Potenzen von x und z . *Sylvester*¹⁸¹⁾ führt

nometrie [III A 2] s. *G. Chisholm*, Gött. Diss. 1875; *Study*, Leipz. Ber. 47 (1895), p. 553; *W. Fr. Meyer*, J. f. Math. 115 (1895), p. 209; Deutsche Math.-Ver. 7¹ (1899), p. 147. — Die mit dem Pascal'schen Satze der C_2 [III C 1] verknüpften Syzygien behandelt *Study*, Leipz. Ber. 47 (1895), p. 532.

178) II. Mem., weitergeführt im IX. und X. Mem. Zu dieser Nr. vgl. den Bericht über kombin. Analysis von *P. A. Mac Mahon*, Lond. Math. S. Proc. 28 (1897), p. 5, sowie den Bericht über Invar. von *H. S. White*, N. York. B. (2) 5 (1899), p. 161.

179) Phil. Mag. 1878, p. 1; J. f. Math. 85 (1878), p. 89; vgl. die Beweise von *Capelli*, Rom. Linc. M. 12 (1881), p. 1; *Hilbert*, Math. Ann. 30 (1887), p. 15; *Stroh*, ib. 31 (1888), p. 441; „Study“ § 9 (p. 197); *E. B. Elliott*, Lond. Math. S. Proc. 23 (1892), p. 298; 24 (1893), p. 21. Wegen der Erweiterungen auf Reciprokanen s. Nr. 20.

180) „Introd. in anal.“ 1, Laus. 1748, deutsch v. *H. Maser*, Berlin 1885, § 304 (I C 3).

181) 11 Noten in Par. C. R. 84, 85 (1877); J. f. Math. 95 (1878), p. 89; 7 Noten in Par. C. R. 86, 87 (1878); Amer. J. of Math. 1 (1878), p. 370; 2 (1879), p. 71, 98; Par. C. R. 87 (1879), p. 395; Amer. J. of Math. 5 (1883), p. 241. Vgl.

die Ordnung g statt w ein und ersetzt demgemäss $\Delta(w; i, j)$ durch $\Delta(i, j; g)$; dann rechnet sich *Euler's* Funktion um in die „rohe“ (crude) erzeugende Funktion:

$$\psi(x, a) = (1 - x^2) / (1 - ax^i)(1 - ax^{i-2}) \cdots (1 - ax^{-(i-2)})(1 - ax^{-i}),$$

d. h. deren Entwicklung nach steigenden Potenzen von a liefert $\Delta(i, j; g)$ als Faktor von $a^j x^g$. — *Cayley*¹⁷⁸⁾ hatte *Euler's* Funktion so umgeformt, dass man auch die Totalanzahl der „irreducibeln“ Komitanten von f_i , d. i. der nicht durch solche von geringerem Grade ganz-rational ausdrückbaren, in gewissen Fällen abliest. So erhält er für $i = 3$ die Funktion $(1 - x^6) / (1 - x)(1 - x^2)(1 - x^3)(1 - x^4)$; somit existieren 4 irreducible Bildungen von den Graden 1, 2, 3, 4, die durch eine Syzygie 6. Grades verknüpft sind. *Cayley* setzt irrthümlicherweise allgemein die lineare Unabhängigkeit eines gewissen Systems linearer Gleichungen voraus (Nr. 6 Anm. 118, und diese Nr. Anm. 184). — *Sylvester*¹⁸¹⁾ geht weiter. Durch Zerlegung in Partialbrüche und Streichung irrelevanter Glieder wird die rohe erzeugende Funktion $\psi(x, a)$ auf eine „reduzierte“¹⁸²⁾ Gestalt gebracht, und dann in einer Reihe von Fällen durch eigentümliche Umformungen in die „repräsentierende“ erzeugende Funktion $\varrho(x, a)$ übergeführt, deren Zähler eine endliche¹⁸³⁾ ganze Funktion $\xi(x, a)$ ist, während der Nenner $\nu(x, a)$ das Produkt aus $1 - ax^i$ mit einer endlichen Anzahl von Faktoren des Typus $1 - a^k$ und $1 - a^2 x^l$ bildet. Z. B. für $i = 5$ resultiert:

$$\nu = (1 - a^4)(1 - a^8)(1 - a^{12})(1 - a^{16})(1 - a^{20})(1 - a^{24}),$$

$$\xi = 1 + a^3(x^3 + x^5 + x^9) + a^4(x^4 + x^6) + a^5(x + x^3 + x^7 - x^{11})$$

$$+ a^6(x^2 + x^4) + a^7(x + x^5 - x^9) + a^8(x^2 + x^4) + \cdots - a^{23}x^{11}.$$

Die repräsentierende erzeugende Funktion $\varrho(x, a)$ ist eine gemeinsame Quelle für die Anzahl (und den Typus) der Grundformen und Syzygien aller Arten. Die Nennerfaktoren repräsentieren die einfachsten, sicher irreducibeln Grundformen, für die $g = 0, 1, 2$ ist. Für eine gegebene „Gradordnung“ („deg-order“) stelle man vorab durch „Siebung“ („tamisage“) alle Potenzen und Produkte niedrigerer

die zusammenfassende Darstellung von *P. Franklin*, Amer. J. of Math. 3 (1880), p. 128, nebst Tabellen: Amer. J. of Math. 2 (1879), p. 223, 293; 3 (1880), p. 221; 4 (1881), p. 41; 5 (1882), p. 241. — Für erzeugende Funktionen im ternären Gebiete finden sich bei *Sylv.* Beispiele; die Grundzüge einer Theorie giebt *Forsyth*, Lond. Math. S. Proc. 29 (1898), p. 487.

182) Ein instruktives Beispiel bei *Cayley*, Amer. J. of Math. 2 (1879), p. 71 = Coll. Pap. 10, p. 408.

183) Wegen scheinbarer Ausnahmefälle vgl. *J. Hammond*, Math. Ann. 36 (1890), p. 255.

Grundformen — excl. der durch $\nu(x, a)$ repräsentierten — auf, und ziehe deren Anzahl vom Koeffizienten von $a^i x^j$ in $\xi(x, a)$ ab. Das liefert die Zahl $[j, g]$ der Grundformen (j, g) , vermehrt um die der Syzygien gerader, vermindert um die der Syzygien ungerader Art. Da der Zähler $\xi(x, a)$ abbricht, erhält man eine untere Grenze für $[j, g]$. So erhält man für $i = 5$ mindestens je eine Grundform $(3, 3)$, $(3, 5)$, $(3, 9)$; $(4, 4)$, $(4, 6)$; etc. und damit eine Minimalzahl 23 von Grundformen der f_5 ; da diese mit *Gordan's* oberer Grenze (Nr. 6) coincidirt, so ist das deren wahre Anzahl. Syzygien 1. Art existieren für $(5, 11)$, $(7, 9)$ etc. Im Falle $(6, 6)$ etwa verschwindet der Koeffizient von $a^i x^j$; da aber $(6, 6) = 2 \cdot (3, 3)$, und eine Grundform $(3, 3)$ existiert, so besteht eine Syzygie 1. Art. — Beachtenswert ist der Fall $(8, 14)$. Hier liest man die Zahl 5 von linear unabhängigen Formen ab, andererseits führt die Siebung zu 10 Produkten von Grundformen. Nun lassen sich 6 Syzygien 1. Art sofort hinschreiben; „mithin sind jene durch eine einzige Syzygie 2. Art¹⁸⁴⁾ verknüpft“. — *Cayley*¹⁸⁵⁾ macht die repr. erz. Funktion $\varphi(x, a)$ durch wirkliche Einführung der Grundformen a, b, c, \dots zur „realen“ erz. Funktion, die auch die Typen der Bildungen liefert. — Andererseits lässt sich $\varphi(x, a)$, bei Kenntniss der Grundformen, nach *J. Hammond*¹⁸⁶⁾ zu einer direkten erz. Funktion für die Syzygien umgestalten, doch so, dass man jetzt für irgend eine Gradordnung eine obere Grenze für die Anzahl der Syzygien 1. Art abliest, die mit *Sylvester's* unterer Grenze zu vergleichen ist.

Das „Fundamentalpostulat“¹⁸⁷⁾ *Sylvester's*, wonach für jede Gradordnung Grundformen und Syzygien sich ausschliessen sollten, hat *Hammond*¹⁸⁸⁾ als nicht allgemeingültig erkannt. *P. A. Mac Mahon*¹⁸⁹⁾ hat eine erz. Funktion für die Anzahl der irreducibeln „Perpetuanten“ (Nr. 12, 23) konstruiert, und *E. Stroh*¹⁹⁰⁾ den Beweis dafür geliefert.

Theoretische Formeln für obere Grenzen von Grad und Ordnung binärer Grundformen haben¹⁹¹⁾ *Jordan* und *Sylvester* aufgestellt. Die

184) Die Nichtberücksichtigung dieser Syzygie 2. Art hatte *Cayley* zu einem Irrtum veranlasst. Vgl. Nr. 6 Anm. 118.

185) X. Mem.

186) Amer. J. of Math. 8 (1885), p. 19.

187) Vgl. etwa *F. Franklin*, Amer. J. of Math. 3 (1880), p. 130.

188) Amer. J. of Math. 5 (1883), p. 218; vgl. „Inv.-Ber.“ p. 174.

189) Amer. J. of Math. 7 (1884), p. 26.

190) Math. Ann. 36 (1890), p. 262, § 10, 11. S. noch Anm. 249.

191) *Jordan*, J. de math. (3) 2 (1876), p. 177; 5 (1879), p. 345; *Sylvester*, Lond. Math. S. Proc. 27 (1878), p. 11; Par. C. R. 86 (1878), p. 1437, 1491, 1519. Beide leiten aus ihren Anzahlbestimmungen einen „Endlichkeitsbeweis“ ab; vgl. Nr. 6 Anm. 136.

Anzahlen von *Jordan* — der, nach *Gordan* (Nr. 6) die kleinsten Lösungen diophantischer Gleichungen zahlentheoretisch diskutiert — für die Ordnung g der Kovarianten in den Fällen $i = 1$ bis 12 (excl. 11) werden thatsächlich erreicht. *Sylvester's* ohne Beweis aufgestellte Formeln sind theoretisch einfacher, praktisch weniger brauchbar. Die Cayley-Sylvester'sche Formel $\Delta(w; i, j)$ für asyzygetische Formen ist auf Urformen F, G, H, \dots mit kogredienten Reihen von n Variablen ausgedehnt worden. Eine Komitante φ lässt sich, wie *A. Capelli*¹⁹²⁾ auf Grund seines „Entwicklungssatzes“ (Nr. 17) darthut, darstellen als Aggregat von Produkten $\Omega\Phi$ von identischen Kovarianten Ω mit Formen Φ von $n - 1$ Variablenreihen, die $n - 1$ charakteristischen linearen partiellen Differentialgleichungen $D_i = 0$ genügen. Die Aufgabe für die φ reduziert sich auf die für die Φ . Für die Anzahl der einer *einzelnen* Gleichung $D_i = 0$ genügenden asyzygetischen Bildungen Φ mit vorgegebenen Gradordnungszahlen ergibt sich ein zu $\Delta(w; i, j)$ analoger Ausdruck; da aber zwischen den durch sämtliche $D_i = 0$ involvierten Bedingungen *lineare Abhängigkeiten* bestehen, begnügt sich *Capelli* mit unteren Grenzen. — *J. Deruyts*¹⁹³⁾ löst die Aufgabe allgemein. Die Φ von vorgegebenen „Gewichtszahlen“ werden durch ihre Leitglieder Φ_0 ersetzt, und diese symbolisch geschrieben (Nr. 23); dadurch gelangt man zu einem System linearer diophantischer Gleichungen mit einer Anzahl II von *linear unabhängigen* Lösungen. Ein analoges System existiert für die Anzahl II' der zu einer Form Φ gehörenden $\Omega\Phi$. Dann ist, entsprechend den verschiedenen Gewichtszahlen, die Summe der Produkte $IIII'$ zu bilden, um die gewünschte Anzahl zu erhalten.

10. Kanonisierung. *Sylvester*¹⁹⁴⁾ begründet die Lehre von den „kanonischen“ Formen, insofern sich eine f_{2n+1} auf nur eine Art in der Gestalt darstellen lässt: $f = \sum_1^{n+1} a_i(\lambda - a_i\mu)^{2n+1}$, wobei der Fall

192) „Fondamenti“; Gi. di mat. 20 (1882), p. 293. Für unabhängige S : Rom. Linc. M. 15 (1884). Wegen einer verwandten Frage bei *Study* vgl. „Inv.-Ber.“ p. 177.

193) „Deruyts“ Chap. 7; allgemein Brux. Belg. B. (3) 21 (1891), p. 437.

194) Cambr. Dubl. math. J. 6 (1851), p. 186; Phil. Mag. (2) 1 (1851), p. 408. *S.* zieht auch das Verschwinden der Diskr. der Kanoniz. in Betracht. Das Wort „kanonisch“ von *Hermite*, bei *Sylvester* Cambr. Dubl. math. J. 6 (1851), p. 193; „Kanonizante“ von *Sylvester*, ib. 7 (1852), p. 67, 195; desgl. „Katalektikante“, ib. 7 (1852), p. 62. Eine gewisse (mehrdeutige) kanonische Darst. der f_n [Ann. 392] und f_8 bei *Sylvester*, ib. (1852), p. 123, 293; 9 (1854), p. 93 (sect. 8). — Eine eigenartige Anwendung von *Sylvester's* Darstellung der f_{2n+1} auf mechanische Quadratur durch *K. Hesse* (*A. Hermite*) findet sich H. A. 2, 172, 4. — 281

$n = 2$ eingehend untersucht wird. Die α_i sind die Wurzeln der „Kanonzante“ c , der Determinante der $(2n)^{\text{ten}}$ Differentialquotienten von f . Bei f_{2n} wird c eine Invariante, die „Katalektikante“, deren Verschwinden das Kriterium der Darstellbarkeit von f als Summe von n Potenzen liefert.

*Cayley*¹⁹⁵⁾ geht hierauf näher ein, und weist nach, wenn $c \neq 0$, dass f_{2n} auf $\infty^1, \infty^3, \dots$ Arten in eine Summe von $(n+1), (n+2), \dots$ Potenzen linear transformiert werden kann. Erst *S. Gundelfinger*¹⁹⁶⁾ berücksichtigt alle Ausnahmefälle, indem er nach Umgestaltung des Differentialausdrucks für $(f_n, \varphi_m)_k$ (Nr. 14) die Theorie der linearen Differentialgleichungen (II B 3 c) heranzieht. Für $f_n = f(x|a)$ bilde man die Kovarianten $c, c', c'' \dots$ mit den Leitgliedern

$$a_0, \begin{vmatrix} a_0 & a_1 \\ a_1 & a_2 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} a_0 & a_1 & a_2 \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ a_2 & a_3 & a_4 \end{vmatrix}, \text{ etc.}$$

Das Kriterium für die Darstellbarkeit von f_n als $\sum_{i=1}^{i=k} b_i (\lambda - \alpha_i)^n$ ist einmal $c^{(k)} \equiv 0$, $c^{(k-1)} \not\equiv 0$, — dann existiert eine Form γ_k , so dass $(\gamma_k, f_n)_k \equiv 0$, — zudem darf γ_k nur ungleiche Wurzeln α_i besitzen. Koinzidieren dagegen Wurzeln von γ_k , so modifiziert sich die Darstellung von f zu $\sum_i (\lambda - \alpha_i)^{k_i} \varphi_{n-k_i}$. — Die Form γ_k hatte schon

*J. Rosanes*¹⁹⁷⁾ als die „zu f konjugierte“ eingeführt, und n Urformen f_n , wie Formen F untersucht. Die Potenzdarstellungen von F werden in Beziehung gesetzt zu den Polpolygonen, Polpolyedern etc. (Nr. 24). Hierzu ist auch *Th. Reye*¹⁹⁸⁾ von mechanischen Gesichtspunkten aus gelangt, und beweist¹⁹⁹⁾ (und erweitert) so den Satz *Sylvester's*²⁰⁰⁾ über das

195) J. f. Math. 54 (1857), p. 48, 292 = Pap. 4, p. 43, 53. — Eine formentheoretische Ausführung im Sinne der Apolarität (Nr. 24) giebt *G. Bauer*, Münch. Ber. 22 (1892), p. 3. Die Darst. von *Sylvester* und *Cayley* dehnt *C. le Paige* auf multilineare Formen aus („Inv.-Ber.“ p. 179); Tor. A. 17 (1882), p. 299; Rom. Linc. Pont. 35 (1882), p. 54, 140.

196) Gött. Nachr. 1883, p. 115; ausgeführt in J. f. Math. 100 (1887), p. 413. Die nämlichen Leitglieder liegen einem Realitätssatze von *W. Fr. Meyer* zu Grunde, s. Nr. 26, Anm. 428.

197) J. f. Math. 75 (1873), p. 172; 76 (1873), p. 312; Math. Ann. 6, p. 264.

198) J. f. Math. 72 (1870), p. 293 [Nr. 24].

199) J. f. Math. 78 (1874), p. 114, 123. Die $F_4(x_1, x_2, x_3, x_4)$ wird als Summe von 10 vierten Potenzen dargestellt.

200) Cambr. Dubl. math. J. 6 (1851), p. 198, wo der Beweis skizziert wird [III C 6]. — Über die *Hesse'sche* Kanonisierung einer C_3 s. Nr. 11, Anm. 210, über die Potenzsummandarst. einer C_3 s. Nr. 24, Anm. 384.

„Pentaeder“ der $F_3(x_1, x_2, x_3, x_4)$ (III C 6), wonach F_3 auf nur eine Art als Summe von fünf Kuben geschrieben werden kann. Eine Verbindung zwischen den Arbeiten von *Rosanes* und *Reye* hat *W. Fr. Meyer*²⁰¹⁾ hergestellt vermöge einer Reihe von kanonischen „Übertragungsprinzipien“ (Nr. 24).

Von *D. Hilbert*²⁰²⁾ stammt ein Invariantenkriterium für die Darstellung $f_{mn} = (\varphi_m)^n$. *Hilbert* hat ferner ein gemeinsames Prinzip²⁰³⁾ für verschiedenartige kanonische Darstellungen, indem er alle φ , sucht, so dass $(\varphi_i, f_{2n})_i = \lambda f_{2n}$ wird, wo λ eine irrationale Invariante (Nr. 11) von f ist; es lassen sich so die Ausartungen von f verfolgen.

Eigenartige kanonische resp. typische Darstellungen der f_6 finden sich bei *A. Brill*²⁰⁴⁾, *W. Fr. Meyer*²⁰⁴⁾, *Brioschi*²⁰⁵⁾, *Maschke*²⁰⁵⁾, *E. Grove*^{206a)}, *H. B. Newson*^{206b)}. *Hilbert*²⁰⁷⁾ stellt eine definite $F_4(x_1, x_2, x_3)$ als Summe von drei Quadraten dar; für eine definite $F_n(x_1, x_2, \dots, x_m)$ können indess — excl. $n=2$, resp. $m=2$ — stets Fälle eintreten, wo die gemeinte Darstellung versagt. Eine definite C_n lässt sich aber stets als ein Bruch von Quadratsummen darstellen²⁰⁸⁾.

11. Umkehrfragen. Irrationale Formen. Hierher gehört das zahlentheoretische Problem von *Hermite*²⁰⁹⁾, das ihn u. a. zu den

201) „Apolarität u. rationale Kurven“, Tübg. 1883, wo weitere Litteratur.

202) Math. Ann. 27 (1886), p. 158; vgl. *Brioschi*, Pal. R. 10 (1896), p. 153. Für einfachere Fälle schon bei *G. Maisano*, Rom. Linc. A. (3) 7 (1883), p. 231. Elementar bei *C. Weltzien*, Progr. Berlin, Fr. Werder'sche Oberrealsch. [I B 1a, Nr. 11].

203) Leipz. Ber. 1885, p. 427; Math. Ann. 28 (1887), p. 381; Beispiele für C_n und F_n in J. de math. (4) 4 (1888), p. 249.

204) Math. Ann. 20 (1882), p. 330. Die bez. $f_6 = x^6 + 2px^5 + 3qx^4 + 4rx^3 + 3x^2 + 2px + q$ und $x^6 + ax^4 + bx^3 + cx^2 + 1$ hängen mit den 3 Doppelpunkten und 4 Doppeltangenten einer rat. C_4 eng zus. Vgl. *W. Fr. Meyer*, Apolarität, p. 312 [Nr. 24]. *Brill* diskutiert die Realität der Wurzeln einer f_6 .

205) $f_6 = x^6 + \alpha x^4 + \beta x^3 + \frac{\alpha^2}{4} x^2 + \gamma x + \delta$, wo $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ die 4 Inv. von f_6 sind. Die Wurzeln von f_6 werden ganze Funktionen von 4 ϑ -Funktionen: *Maschke*, Gött. Nachr. 1887, p. 421; Math. Ann. 30 (1887), p. 496; Rom. Linc. A. (4) 4 (1888), p. 181; *Brioschi*, Acta math. 12 (1888), p. 83. Eine andere typische Form der f_6 (ohne x^5 und x^3) bei *Brioschi* mittels Syzygien: Ann. di mat. (2) 11 (1883), p. 291. Eine $f_6 = H(f_6)$ ist der bez. „Multiplikatorgl.“ [I B 4a] äquivalent: *Lindemann*, Math. Ann. 21 (1883), p. 71.

206a) Kans. Qu. J. 6 (1897), p. 201. 206b) Kans. Qu. J. 7 (1898), p. 125.

207) Math. Ann. 32 (1888), p. 342. — Speziell eine resp. zwei f_n als Quadratsummen bei *H. Laurent*, J. de math. spéc. (5) 21 (1897), p. 51.

208) Acta math. 17 (1893), p. 169.

209) J. f. Math. 40 (1850), p. 261, 279. Das Problem hat erst *C. Jordan* erledigt: Par. C. R. 90 (1880), p. 598, 1422.

„Evektanten“ (Nr. 18) führte, nachzuweisen, dass die Anzahl der „Klassen“, in die die F_n mit vorgegebenen Werten für die Invarianten zerfallen, eine endliche ist.

Aus einer $C_3 = 0$ schneidet nach *Hesse*²¹⁰⁾ $H(C_3) \equiv H_3 = 0$ die Wendepunkte aus; umgekehrt gehören zu gegebener H_3 drei C_3 , die *Aronhold*²¹¹⁾ genauer untersucht hat. Später hat man alle nicht äquivalenten „Typen“ von Büscheln $f_n + \lambda \varphi_n$ gesucht, deren $(f, \varphi)_1$ eine gegebene $f_{2(n-1)}$ ist; *Brill*²¹²⁾ bewies, dass es eine endliche Zahl von Typen gebe. Für $n = 4$ sind es fünf, die von einer f_5 abhängen, die *C. Stéphanos*²¹³⁾ in invarianter Gestalt aufstellte; *Brill*²¹²⁾ untersucht die Beziehungen der fünf Lösungen zur Theorie mehrerer f_2 und der f_6 , *W. Fr. Meyer*²¹²⁾ die zu den rationalen C_4 und C_6 , und zu den kubischen Raumkurven. *M.* fand geometrisch die Anzahl ν der Typen bei beliebigem n , $= 2(2n-3)!/n!(n-2)!$, die algebraisch durch *Stéphanos*²¹⁴⁾ und anzahlgeometrisch durch *H. Schubert*²¹⁵⁾ bestätigt wurde. *Hilbert*²¹⁶⁾ bildete auf Grund eines Überschiebungsprinzips (Nr. 10) die Gleichung für die ν Lösungen, und erledigte auch das analoge Problem der Büschel mit gegebener Diskriminante²¹⁷⁾. — Für zwei unabhängige Variable hat *H. Hurwitz*²¹⁸⁾ funktionentheoretisch die Urformen bestimmt, wenn die Diskriminante oder vielmehr deren

210) J. f. Math. 28 (1844), p. 68 = Werke p. 123. Dem Büschel $\lambda C_3 + \mu H_3$ gehören 4 Dreiecke an, die „Wendendreiseite“ [III C 3, 4]; eine C_3 kann daher auf 4 Arten in die „Hesse'sche Normalform“ $x_1^3 + x_2^3 + x_3^3 + 6kx_1x_2x_3$ gebracht werden [Anm. 392, 434]. Die bez. $f_4 = 0$ ist für die Formentheorie der C_3 nach *Aronhold* fundamental [Anm. 211, 434]. Vgl. „Clebsch-Lindemann“ 1².

211) J. f. Math. 55 (1858), p. 97.

212) Math. Ann. 20 (1882), p. 330. Vgl. *W. Fr. Meyer*, Apolarität p. 320. Eine einfache Deutung der 5 Lösungen liefern nach *Brill* die 5 vollständigen Vierecke der *Desargues'schen* Konfiguration [III A 3] von 2 perspektiven Dreiecken, die in Bezug auf eine feste $C_2 = N_2$ zu sich selbst polar ist; die 5 bez. C_2 -Büschel schneiden aus N_2 die f_4 -Büschel des Textes aus. — Für $n = 3$ bei *H. Caporali*, Nap. R. 22 (1888), p. 95; vgl. *L. Berzolari*, Nap. R. (2) 5 (1891), p. 35, 71.

213) Preisschrift Par. Sav. Étr. 1883. Auszug: Par. C. R. 93 (1881), p. 994. Ist das f_4 -Büschel das der Polaren einer f_5 , giebt es nur eine Lösung: *Lindemann*, Math. Ann. 21 (1883), p. 72.

214) Thèse, Paris 1884.

215) Acta math. 8 (1886), p. 97.

216) Leipz. Ber. 1887, p. 112; Math. Ann. 33 (1888), p. 217.

217) Math. Ann. 31 (1888), p. 482 [I B 1 a, Nr. 21, Anm. 117].

218) Math. Ann. 39 (1891), p. 1 (wo weitere Litter.); vgl. *É. Picard*, Traité d'analyse 2 (1892), Chap. 6. — *Frobenius* bestimmt die ∞^2 -Schar der $f_2(x|y)$, deren beide Diskriminanten (d. s. binäre Formen f_4) gegeben sind: J. f. Math. 106 (1890), p. 125.

„wesentliche“ Teiler gegeben sind [I B 1 c, Nr. 6; I C 4]. Bei ihrer Behandlung der $f_5 = 0$, und auch gewisser $f_7 = 0$ (Nr. 5) hatten *Klein*²¹⁹⁾ und *Gordan*²¹⁹⁾ die Gleichungen für die Urformen aufzustellen, wenn man den bez. Grundformen feste (sc. erlaubte) Zahlenwerte beilegt.

Irrationalen Formen begegnet man bei den elliptischen und *Abel*-schen Funktionen. Nach *Klein*²²⁰⁾ ist das elliptische Integral J_1 1^{ter} Gattung ∞ vieler „kanonischer“ Gestalten fähig, je nach der bez. „Normalkurve“; der Modul von J_1 ist eine absolute irrationale Invariante der Kurve. Für $p = 3$ ²²¹⁾ liegt eine C_4 zu Grunde; dem Rationalitätsbereich werden irrationale Teile der Systeme der „Berührungskurven“ (III C 2, 3) „adjungiert“, wodurch sich die Form der Integrale, ϑ -Funktionen und deren Differentialgleichungen reguliert; die eindeutig-rationale Transformation der bez. algebraischen Funktionen wird äquivalent mit der Kollineation der „ φ “ d. i. der Ebene. Insbesondere²²²⁾ benötigt man dabei gewisser Kombinant.

Wegen verwandter Untersuchungen vgl. Nr. 7, 14, und II B 4a, b.

12. Symbolik und graphische Darstellung. *Cayley*²²³⁾ erzeugt mittels eines symbolischen Prinzips („Hyperdeterminantenkalkül“) beliebig viele Invarianten einer Urform F . Die Invarianz erscheint als

219) S. Anm. 96, 107. — Überhaupt ist die „Lösung“ einer $f_n = 0$ mit beliebiger *Galois*'scher Gruppe nach *Klein* in dem „Formenproblem“ enthalten: „Gegeben eine endliche Gruppe G von $S(x_1, x_2, \dots, x_n)$; die x aus den Invarianten von G zu berechnen“. *Klein* „reduziert“ so die $f_5 = 0$ auf das binäre „Ikosaederproblem“, die allg. $f_6 = 0$ und $f_7 = 0$ auf quaternäre Formenprobleme [Nr. 5, Anm. 96, 111, 112]. Von $n > 7$ an ist eine entsprechende Reduktion (auf Formenprobleme von $< n - 2$ Dimensionen) nicht möglich: *A. Wiman*, Gött. Nachr. 1897, p. 55, 191 [I B 3 f, Nr. 15]; *Math. Ann.* 52 (1899), p. 243.

220) *Math. Ann.* 17 (1880) p. 133; *Leipz. Abh.* 1885, p. 339; Vgl. *G. Pick*, *Math. Ann.* 28 (1887), p. 309; 29 (1887), p. 259; 32 (1888), p. 443. Vgl. noch die verwandten Untersuchungen von *Bruno*, *Amer. J. of Math.* 5 (1882), p. 1; *Burkhardt*, *Diss. München* 1887, sowie die Darstellung bei *Halphen*, *Fonctions elliptiques* 2, Par. 1888 und die Formeltabelle bei *J. Stringham*, *Chic. Pap.* 1896 (93), p. 350 [II B 4a].

221) *Pick*, *Math. Ann.* 29 (1887), p. 259; *Klein* s. Anm. 222; *E. Willheiss*, *Math. Ann.* 38 (1890), p. 1; *E. Pascal*, *Ann. di mat.* (2) 17 (1889) p. 81, 197, 257; ib. 18 (1890), p. 1, 131; ib. 20 (1892), p. 163; ib. 24 (1896), p. 193. — Für *Abel*'sche Integrale s. etwa *H. S. White*, *Nova Acta Leop.* 62² (1887), p. 43 [II B 4b].

222) *Klein*, Gött. Nachr. 1888, p. 191; *Math. Ann.* 36 (1890), p. 1; ausgeführt von *H. Wirtinger*, *Math. Ann.* 40 (1892), p. 361. Vgl. *Klein*, *Lineare Diff. Gleichungen* d. 2. Ordn., Aut. Vorl., Gött. 1890/91, 1894; und „Inv.-Ber.“ II B 6, p. 185.

223) *Cambr. math. J.* 4 (1845), p. 193 = *Pap.* 1, p. 80. Vgl. *Anm.* 17.

Erweiterung des Determinantenmultiplikations-Theorems (Nr. 1); einmal werden Determinanten „höheren Ranges“²²⁴) („Kommutanten“) aus $(k!)^n$ Gliedern gebildet, andererseits wird ein Aggregat von Determinanten unter der Form einer „Matrix“²²⁵) zusammengefasst. Die Abkürzung in der Bezeichnung ist eine erste Art von Symbolik. Dabei wird eine Urform $F_n(x_1, x_2, \dots, x_m)$ ersetzt²²⁵) durch eine allgemeinere („ n -partite“), die in n Reihen von m Variabeln, die alle verschiedenen S unterworfen werden können, je linear ist; eine Invariante von F ändert sich dabei um eine Potenz des Produktes der Moduln (Nr. 2). Nachträglich lassen sich einige oder alle n Variablenreihen identifizieren. Bald darauf²²⁶) formuliert *Cayley* sein Erzeugungsprinzip real. Er fasst die Funktionaldeterminante $\left| \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_k} \right|$ von n Funktionen $\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ auf als das Resultat eines Prozesses Ω (Nr. 14), ausgeübt auf das Produkt der φ , jede in einer andern Variablenreihe geschrieben. Durch Iterirung entstehen invariante Prozesse, die aus Urformen Komitanten erzeugen. Die zugehörige Symbolik ist eine Abkürzung in der Darstellung realer Prozesse. *Cayley* schreibt:

$$\Omega = \overline{1 \cdot 2 \cdots n} = \left| \frac{\partial}{\partial x_{i1}}, \frac{\partial}{\partial x_{i2}}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_{in}} \right|_{(i=1, 2, \dots, n)},$$

d. i. $\sum \pm \frac{\partial^n}{\partial x_{11} \partial x_{22} \dots \partial x_{nn}}$, wo die ersten (zweiten) Indices wie bei einer Determinante permutiert werden.

Von dieser Symbolik weicht die von *Aronhold*²²⁷) begründete, von *Clebsch*, *Gordan*²²⁸) u. a. ausgebildete materiell nicht wesentlich

224) Vgl. Anm. 17, 226.

225) Cambr. Trans. 8 (1843), p. 1 = Pap. 1, p. 63. S. auch *Sylvester*, Cambr. Dubl. m. J. 7 (1852), p. 75 (Sect. III). Vgl. Anm. 17.

226) Cambr. Dubl. m. J. 1 (1846), p. 104 = Pap. 1, p. 95.

227) J. f. Math. 62 (1863), p. 281. Das Prinzip schon bei *Sylvester*, Cambr. Dubl. m. J. 7 (1852), p. 94. Die symb. Bezeichnung dient *Hermite* ib. 9 (1854), p. 173 als Beweisgrund des „Reciprozitätsgesetzes“ (cf. Anm. 233* und Nr. 16).

228) Vgl. Anm. 27. Über den formalen Unterschied zwischen der englischen und deutschen Symbolik s. *Cayley*, Pap. 1 (1889), p. 585. — Über die Verwandtschaft von *Clebsch's* binärer Symbolik mit der der Quaternionen s. etwa *J. B. Shaw*, N. Y. Bull. (2) 4 (1897), p. 6. — Im binären Gebiet lässt sich eine analoge „Wurzelsymbolik“ aufbauen, die mit den wirklichen Linearfaktoren der Formen operiert, und somit für die explicite Berechnung der In- und Kovarianten besonders geeignet erscheint. Beide Arten von „Symbolik“ sind in einander überführbar. Man vgl. bes. *A. L. Mackinnon*, Ann. of Math. 9 (1895), p. 95, dazu Tabellen ib. 12 (1898), p. 95, auch *Mertens*, Krak. Abh. 22 (1892), p. 141, sowie die Endlichkeitsbeweise von *Mertens* und *Hilbert* in Nr. 6. Das ternäre, ... Gebiet wird durch Entwicklung nach Potenzen

ab (Nr. 14), wohl aber in der Auffassung und der allmählich erlangten bequemeren Handhabung. Nach Analogie der Kummer'schen idealen Zahlen (I C 3), von denen erst ein gewisses Produkt wieder real ist, setzt man²²⁹⁾, um die Invarianten J einer Urform $F_v(x_1, x_2, \dots x_n | a) = F_v(x | a)$ auf die von Linearformen zurückzuführen, F_v gleich einem Produkte von ν n -gliedrigen idealen oder „symbolischen“ Linearformen $\alpha_x \beta_y \dots \nu_w$, und ersetzt nach Ausrechnung die Produkte der Koeffizienten resp. Variablen durch die entsprechenden Terme in F . Der Rückgang zur realen Urform F bleibt eindeutig, wenn man die Linearformen identifiziert, also mit *Aronhold*²²⁷⁾ $F_v = \alpha_x^\nu = \beta_x^\nu = \dots$ schreibt; zur Darstellung einer Form p^{ten} Grades in den a sind gerade p „Symbole“ α, β, \dots erforderlich. Dabei ist F eine „allgemeine“ Form ihrer Ordnung, insofern lineare Relationen zwischen den a ausgeschlossen sind. — Geht durch eine S der x $F(x | a)$ über in $F'(x' | a')$, also symbolisch α_x^ν in $\alpha_{x'}^\nu$, so hängen die a' von den α , bis auf die Transposition der Substitutionskoeffizienten gerade so ab, wie die x von den x' (Nr. 2). Jedes aus den n -reihigen Determinanten (α, β, \dots) der α, β, \dots derart gebildete Produkt, dass jede Symbolreihe ν -mal vorkommt, ist eine ganz-rationale Invariante J von F . *Clebsch*²³⁰⁾ bewies die Umkehrung, dass jedes J als ein Aggregat solcher Produkte darstellbar ist, mit Ausdehnung auf mehrere Urformen F . Für $n > 3$ aber, wo noch die Zwischenvariablen (Nr. 2, 18) p_{ik}, p_{ikl}, \dots zu berücksichtigen sind, lässt sich, trotz mancher Einzeldarstellungen²³¹⁾, die Gesamtheit des Formen-

von x_1 resp. x_2 resp. $x_3 \dots$ auf das binäre zurückgeführt; ternäre, ... Komittanten erscheinen so als binäre Simultaninvarianten, woraus sich auch ihre Differentialgleichungen (Nr. 18) ableiten lassen. *S. Brioschi* (für eine C_4) *Ann. di mat.* (2) 7 (1876), p. 202; *Brill*, *Math. Ann.* 13 (1878), p. 175; *Forsyth*, *Amer. J.* 12 (1889), p. 1, 115; *Cambr. Trans.* 14 (1889), p. 409 (vgl. *Ann.* 154); *R. Perrin*, *Paris Soc. M. Bull.* 18 (1890), p. 1 und „*Elliott*“.

Allgemeiner führt *E. Wölffing* die Invarianten einer ganzen bzw. rationalen, bzw. irrationalen Funktion von Urformen auf Simultaninvarianten der letzteren zurück; *Math. Ann.* 43 (1893), p. 26, in besonderen Fällen schon in der *Tübinger Diss.* 1890 = *Math. Ann.* 36, p. 97. Der Formenkreis gliedert sich hierdurch nach Typen, Stämmen, Familien; die Theorie der Seminvarianten (Nr. 23) wird so erweitert, u. s. f.

229) „*Study*“ 1, § 5; 2, §§ 2, 5, 6.

230) *J. f. Math.* 59 (1861), p. 1. „*Clebsch*“ § 12. Weitere Beweise bei „*Gordan*“ 2, § 9; „*Study*“ § 5.

231) *Clebsch*, *Gött. Abh.* 17 (1872), p. 1; insbes. für Linienkomplexe *Math. Ann.* 2 (1869), p. 1; weiter entwickelt mit *Grassmann'schen* Symbolen von *E. Waelsch*, *ib.* 37 (1890), p. 141, vgl. *Ann.* 244. Wegen der fragl. Schwierigkeiten vgl. *Gordan* „*Programm*“, *Anhang; Study*, *Leipz. Ber.* 1890, p. 172.

kreises nicht mehr übersehen, sondern nur der Teil, der, wie auch die F selbst, nebst mehreren cogredienten Reihen von (x) noch contragrediente Reihen (u) enthalten kann. — Die n -reihigen Determinanten der α, β, \dots sind durch ein System von Relationen $R_1 = 0, R_2 = 0, \dots$ verknüpft, die zu identischen Umformungen von Invarianten verwandt werden. Umgekehrt, wie *Gordan*²³²⁾ für $n = 2$, *Study* für $n = 3$, *E. Pascal* allgemein²³³⁾ bewiesen, lässt sich die linke Seite jeder, durch Einsetzen der a, b, \dots erfüllten Invariantenidentität als eine mit den R verschwindende Form darstellen. Die Zwischenvariablen sind wiederum auszuschliessen.

Von *Hermite*^{233a)} rührt das „Reziprocitätsgesetz“ her, wonach jeder Kovariante einer f_n (von der Ordnung m und) vom Grade g eine Kovariante einer f_g (von der Ordnung m und) vom Grade n entspricht. — *Clebsch* stellte ein für die Geometrie fruchtbares „Übertragungsprinzip“^{233b)} auf, das an einem besondern Falle erklärt und in geometrischer Fassung lautet: Sei i eine Invariante von $f_n = a_x^n = b_x^n = \dots$, so ersetze man in i jeden „Klammerfaktor“ (ab) durch (abu) , so erhält man eine Kontravariante $\Gamma(u)$ von $C_n = a_x^n = b_x^n = \dots$. Dann ist $\Gamma(u) = 0$ der Ort der Geraden (u) , die aus $C_n = 0$ die Punkt- n -tupel mit der projektiven Eigenschaft $i = 0$ ausschneiden.“ Ein anderes Übertragungsprinzip hat *Gordan*²³⁴⁾ zum Aufbau voller Systeme (Nr. 6) benützt. „Sei etwa G eine Komitante von $C_n(x|a) = a_x^n = b_x^n = \dots$, vom Grade $m - 1$ in den a , so ersetze man in G λ Faktoren b_x, c_x, \dots durch $(bau), (cav), \dots$; κ Faktoren $(bcu), (bdu), \dots$ durch $(bca), (bda), \dots$ und multipliziere mit $a_x^{n-(2+\kappa)}$, so erscheint eine Reihe von Formen H vom Grade m in den a . Ist

232) „Gordan“ 2, Nr. 117; *E. Study*, Math. Ann. 30 (1887), p. 120; „Study“ § 6; *E. Pascal*, G. di mat. 26 (1888), p. 33, 102; Rom. Linc. R. (4) 4 (1888), p. 119; ib. Mem. (4) 5 (1888), p. 375. Im binären Gebiet giebt es nur die eine Identität $a_x b_y - a_y b_x - (ab)(xy) \equiv 0$. Es gilt die nämliche Einschränkung wie oben: „Study“ p. 204.

233a) Cambr. Dubl. m. J. 9 (1854), p. 172 (Anm. 227). S. die Beweise bei „Gordan“ 2, Nr. 93. *J. Deruyts* hat das Gesetz auf (in Linearformen) zerfallende F_n ausgedehnt: Brux. Bull. (3) 22 (1891), p. 11; s. den kurzen arithmetischen Beweis von *Gordan*, Gött. Nachr. 1897, p. 182. [Eine bemerkenswerte Anwendung des Satzes von *Deruyts* auf das Kriterium für das Zerfallen von C_n in Linearfaktoren macht *Gordan* s. I B 1 b, Nr. 5, I B 3 b, Nr. 26, desgl. auf die invariante Darst. der Resultante von 3 C s. Nr. 25, Anm. 405]. — Wegen einer weitergehenden Ausdehnung durch *Hurwitz* vgl. Nr. 16, Anm. 294.

233b) Vgl. z. B. „Clebsch-Lindemann“ 1¹, p. 274. Erweiterungen bei *Gundelfinger*, Math. Ann. 6 (1872), p. 16; „Study“ 2, § 19 [Nr. 24].

234) Math. Ann. 1 (1869), p. 90; 17 (1880), p. 217.

dann ein System von Formen G „linear vollständig“, sodass jede Form vom Grade $m - 1$ linear durch die G ausdrückbar ist, so ist es auch das System der Formen H .“

*E. Stroh*²³⁵⁾ hat die Symbolik von *Aronhold-Olebsch* vereinfacht. Sei die Urform $f_n = (a_1 x_1 + a_2 x_2)^n$ ($\lambda = 1, 2, \dots$), so darf man die Symbole a gleich 1 setzen. Das Leitglied c_0 einer Kovariante c vom Grade i und vom Gewicht g (Nr. 18) genügt der charakteristischen

Gleichung $\sum_{\lambda=1}^i \frac{\partial c_0}{\partial a_\lambda} = 0$. Deren allgemeinste ganz-rationale Lösung c_0

ist nach *Hesse*²³⁶⁾ die allgemeinste Form der $a_2 - a_1, a_3 - a_1, \dots, a_i - a_1$ von einer Ordnung $g \leq n$, die auch ersetzbar sind durch ebensoviel „Grundsymbole“ $A_\lambda = \lambda_1 a_1 + \dots + \lambda_i a_i$ ($\sum \lambda = 0$). Nimmt man n hoch genug, so werden die c_0 zu „Seminvarianten“ (Nr. 9, 23); diese sind bei festen i, g durch Grundsymbole linear ausdrückbar; insbesondere lassen sich so alle irreducibeln (i. e. die „Perpetuanten“) [vgl. unten Anm. 249 u. Nr. 23] der Anzahl und Form nach ermitteln.

Eine erweiterte Symbolik tritt bei Formen mit mehreren unabhängigen Variablenreihen z. B. bei Kombinant²³⁷⁾ auf (Nr. 24), wo Urformen $\alpha_x^n \alpha_y^n$ zu Grunde gelegt werden.

Die beiden Hauptsymbole der Lie'schen Theorie [II A 6], Xf und $(X_i X_k)$, hat *Study*²³⁸⁾ als invariante Prozesse eingeführt.

Die atomistischen Strukturformeln der Chemie sind den symbolischen für die Formen c einer $f_n(x)$ nach *Sylvester*²³⁹⁾ analog. Die Wertigkeit des Elements ist n , die Anzahl der gebundenen Wertigkeitseinheiten entspricht dem Gewicht von c ; die gesättigten Verbindungen den Invarianten, die ungesättigten den Kovarianten etc.

*Clifford*²⁴⁰⁾ hat eine mehr geometrische Graphik. Jede Wurzel x_i von f_n wird durch einen Punkt einer Ebene, jedes $x_i - x_k$ durch eine

235) Math. Ann. 36 (1890), p. 262. Für die C_n l. c. § 12.

236) J. f. Math. 42 (1851), p. 117 = Werke p. 289. Der Satz vermittelt bei *Stroh* auch den Zusammenhang mit den Syzygien (Nr. 8, Anm. 176).

237) *Stroh*, Math. Ann. 22 (1883), p. 393; *Gordan*, ib. 5 (1872), p. 95. Für Komb., die von den x und u abhängen, vgl. „Study“ 2, § 13; *Stroh*, Progr. Münch. Realsch. 1894. Eine analoge Symbolik für $f_2(x|y)$ bei *A. Capelli*, Gi. di

mat. 17 (1879), p. 69 [Anm. 30]; allg. für $f(x|y)$ bei *Gordan*, Math. Ann. 33 (1889), p. 372. Für multilineare Formen bei *C. le Paige*, Brux. Bull. (3) 2 (1881), p. 40.

238) „Study“ 2, § 15. „Lie-Scheffers, Kontin. Transf.-Gruppen“ Kap. 23.

239) Amer. J. of Math. 1 (1878), p. 63 (Anwendungen in den Appendices). Die wirkliche Zuordnung bei *W. K. Clifford* ib. p. 126; vgl. *J. W. Mallet* ib. p. 277.

240) Lond. Math. S. Proc. 10 (1879), p. 124, 214; vgl. *W. Spottiswoode* ib. p. 204.

Verbindungsline dargestellt. Die Reducibilität²⁴¹⁾ von Formen zeigt sich als Überlagerung von Bildern²⁴²⁾ („graphs“). *J. Petersen*²⁴³⁾ beweist so den diophantischen Hilfssatz *Gordan's* (Nr. 6, Anm. 128) anschaulich.

Die Formentheorie haben²⁴⁴⁾ *H. Grassmann* und *Clifford*²⁴⁵⁾ der extensiven Algebra untergeordnet. So erhält man aus $f_{1,1} = \sum a_{ik} x_i y_k$, $g_{1,1} = \sum b_{ik} x_i y_k$ ($i, k = 1, 2$): $(f, \varphi)_2 = a_{11} b_{22} - a_{12} b_{21} - a_{21} b_{12} + a_{22} b_{11}$, wenn man im Produkte $f\varphi$ die „Einheitenprodukte“ den Gesetzen unterwirft: $x_i^2 = y_i^2 = 0$, $x_1 x_2 = -x_2 x_1 = y_1 y_2 = -y_2 y_1 = 1$.

*Mac Mahon*²⁴⁶⁾ und *Cayley*²⁴⁷⁾ haben eine binäre Symbolik auf die symmetrischen Funktionen basiert. Sei $f_m(x|a)$ die Urform, c_0 irgend ein Leitglied (Nr. 23), so bleibt c_0 ein solches für jede f_n ($n > m$), die mit f_m die ersten $m+1$ Koeffizienten gemein hat; c_0 heisst eine Sem-(Sub-)invariante (Nr. 23) der $a_0, a_1, \dots, a_n, \dots$

Man schreibe $f_n = 1 + \frac{b}{1} x + \frac{c}{1 \cdot 2} x^2 + \dots = (1 - \alpha x)(1 - \beta x)(1 - \gamma x) \dots$

Dann ist nach *Mac Mahon* jede ganze Funktion der $\alpha, \beta, \gamma, \dots$, die sie symmetrisch und vom Grade > 1 enthält („nicht-unitär“ ist), eine Seminvariante der $a = 1, b, c, \dots$. So ist z. B. $\sum \alpha^2 = -(c - b^2)$, $2 \sum \alpha^3 = -(d - 3bc + 2b^3)$. Schreibt man „partitionssymbolisch“²⁴⁸⁾ $2 = \sum \alpha^2$, $3 = \sum \alpha^3$, $6552 = \sum \alpha^6 \beta^5 \gamma^5 \delta^2$ etc., so gelten die Verknüpfungsregeln der symmetrischen Funktionen [I B 3 b, Nr. 2, 13]: $lm = (l+m) + (lm)$ ($l \geq m$) etc. Jede Syzygie (Nr. 8) erzeugt weitere, indem z. B. 552 geändert wird in resp. 5552, 6552, 7552 etc. *Cayley*

leitet so die erzeugende Funktion (Nr. 9) $\frac{x^j}{(1-x^2)(1-x^3)\dots(1-x^j)}$ ab, nach deren Entwicklung der Koeffizient von x^w die Zahl der aszygetischen Seminvarianten vom Grade j und Gewichte w ist. *Mac Mahon*²⁴⁹⁾ konstruiert induktiv die erz. Funktion $x^{2^j-1} - 1 | 2.3.4\dots j$

241) Über den sog. „Zerlegungssatz“ von *Clebsch* vgl. „*Clebsch*“ p. 257.

242) *A. Buchheim*, Lond. Math. S. Proc. 17 (1886), p. 80; *A. B. Kempe* ib. p. 107; 24 (1893), p. 97 „rechnet“ mit den Bildern der Invarianten.

243) *Acta math.* 15 (1891), p. 193.

244) *Math. Ann.* 7 (1874), p. 12, 538. Vgl. *R. Sturm* in *Math. Ann.* 14 (1879), p. 9.

245) *Lond. M. S. Proc.* 10 (1879), p. 124, 214; vgl. *W. Spottiswoode* ib. p. 204.

246) *Amer. J. of Math.* 7 (1884), p. 26. Bez. der daran sich anschliessenden „neuen“ Theorie der symmetrischen Funktionen desselben Verf. s. I B 3 b, Nr. 10.

247) *Amer. J. of Math.* 7 (1884), p. 1, 59; *Quart. J.* 20 (1884), p. 212.

248) Die Beziehung zur universellen Algebra *Sylvester's* bei *Sylv.*, *Amer. J. of Math.* 5 (1883), p. 79; ib. 6 (1883), p. 270; *B. Peirce*, ib. 4 (1881), p. 97.

249) l. c. Einen andern, mehr verifizierenden Beweis für *Stroh's* Formel (Anm. 235) giebt *P. Mac Mahon*, *Lond. Math. S. Proc.* 26 (1895), p. 262 (Anm. 336). Vgl. *Cayley*, Anm. 250.

für die „Perpetuanten“ i. e. irreducibeln Seminvarianten, die von *Stroh*²⁴⁹⁾ bewiesen wurde (diese Nr. oben). *Cayley*²⁵⁰⁾ hat diese Richtung ausgebildet und ausgedehnte Tabellen hinzugefügt.

13. Aronhold's Prozess. Polaren. Der „Aronhold'sche Prozess“ lautet: $D_{pq} = \sum q_i \frac{\partial}{\partial p_i}$, unter p_i, q_i 2 kogrediente Grössenreihen verstanden; sind die p_i, q_i Variable, so sagt man meist „Polarenprozess“²⁵¹⁾. — Sind b_i, a_i gleichstellige Koeffizienten von 2 Formen F_n, G_n , so vermittelt D_{ba} ^{251a)} nach *Aronhold* und *Clebsch* die symbolische Darstellung einer Invariante g^{ten} Grades einer Urform als Simultaninvariante von g Linearformen (Nr. 12). — Solange die b von den a unabhängig sind, lässt sich D_{ba} direkt iterieren; besteht aber zwischen den b, a eine invariante Verknüpfung, so zieht man mit *Gordan*²⁵²⁾ Rekursionsformeln resp. Reihenentwicklungen (Nr. 17) heran. — Wenn $D_{ba}J = 0$ ist, ist J eine Kombinate (Nr. 24) von $F_n(x|a), G_n(x|b)$; Abhängigkeiten zwischen den a und b sind hier schwer zugänglich²⁵³⁾.

D_{ba} wird zum „Evektantenprozess“²⁵⁴⁾, wenn $F(x|a)$ die reale μ^{te} Potenz von u_x , $G(b)$ eine Invariante μ^{ten} Grades von F ist. Sei f_n die Urform, Ei die erste Evektante der Invariante i , so ist $(f, Ei)_{n-1} \equiv 0$, $(f, Ei)_n = ci$, wo c ein Zahlenfaktor; diese beiden Eigenschaften sind nach *Gordan*²⁵⁵⁾ den beiden Differentialgleichungen für i äquivalent.

Sind die p_i, q_i irgend 2 Kolonnen der S -Koeffizienten und geht $F(x|a)$ durch S über in $F'(x'|a')$, $J(a)$ in $J'(a')$, so sind $D_{pq}J' = 0$ nach *Aronhold*²⁵⁶⁾ die Differentialgleichungen für eine

250) Amer. J. of Math. 15 (1893), p. 1.

251) Vgl. wegen der Bedeutung des Polarenprozesses für die Geometrie z. B. *H. Thieme*, Math. Ann. 28 (1887), p. 133, sowie die ausführlicheren Lehrbücher über neuere Geometrie z. B. „*Clebsch-Lindemann*“.

251a) Über eine bemerkenswerte Anwendung des Prozesses D_{ba} bei *Aronhold* auf die Umformung des Integrals $\int R(x, y) dx$, wo R eine rationale Funktion, und x, y an eine Relation $C_2(x, y, 1) = 0$ gebunden sind, s. II A 2, Nr. 29, Anm. 175, 179.

252) „*Gordan*“ 2, § 5.

253) l. c. § 6, bes. p. 74. Ein besonderer Fall bei *Gundelfinger*, Math. Ann. 4 (1871), p. 164.

254) „*Gordan*“ 2, p. 128; „*Study*“ p. 41.

255) „*Gordan*“ 2, p. 129; für C_n : „*Study*“ p. 170. Vgl. Nr. 18, Anm. 316.

256) J. f. Math. 62 (1863), bes. p. 287, 293; weiter entwickelt bei *P. Gram*, Math. Ann. 7 (1874), p. 230.

Invariante J (Nr. 18). *F. di Bruno*²⁵⁷⁾ hat die direkte Überführung in die übliche Form vollzogen.

*Gordan*²⁵⁸⁾ entwickelt ein symbolisches Produkt mit 2 Variablenreihen $(x_1, x_2), (y_1, y_2)$ in eine Summe von Polaren, die nach Potenzen von (xy) fortschreitet. Man schreibe die Urform $f_{m+n}(x)$ symbolisch $= a_x^m b_x^n$; die k^{te} Polare P von f bez. der (y) wird eine Summe von $k+1$ Gliedern G_1, G_2, \dots , dann besitzt $G_i - G_k$, wie auch $G_i - P$ selbst, den Faktor $(xy)(ab)$; bei geeigneter Erweiterung stellt G jedes symbolische Produkt in $(x), (y)$ dar. Der Satz ist ausdehnbar auf m Variablenreihen, auf ternäre Formen etc.

*A. Capelli*²⁵⁹⁾ hat den Polarenprozess zum Kern der Formentheorie gemacht; bei n Reihen von ν Variablen $(x), (y), \dots (v)$ fragt er nach den Verknüpfungen zwischen den $n^2 = N$ „elementaren“ Operationen $D_{xx}, D_{xy}, \dots D_{yx}, D_{yy}, \dots$. So ist der „Klammerausdruck“ $D_{ik} D_{lm} - D_{lm} D_{ik}$ eine lineare Form der D u. s. f. Identitäten der Art führen zu den charakteristischen Differentialgleichungen für die Polaren²⁶⁰⁾. — Allgemeiner, wenn $D_1, D_2, \dots D_N$ die D in irgend einer festen Folge bezeichnen, lässt sich jede Form F der D — die von der Folge der D in jedem Gliede abhängt — in die Gestalt bringen $\sum c D_1^{\alpha_1} D_2^{\alpha_2} \dots D_N^{\alpha_N}$. Soll F mit jeder analogen Operation i. e. mit allen D vertauschbar sein, so wird F in den n Variablenreihen symmetrisch und eine beliebige Form von n einfachsten, linear unabhängigen Operationen. Damit werden andere invariante Prozesse, vor allem „ Ω “ (Nr. 2, 14) auf die D reduziert. Für Δ als Determinante der $(x), (y), \dots (v)$ wird $\Omega\Delta$ die Determinante der D_{xx}, D_{xy}, \dots , nur dass²⁶¹⁾ in der Diagonalreihe noch die Zahlen $0, 1, 2, \dots n-1$ additiv hinzutreten²⁶²⁾.

14. Überschiebungs- und Ω -Prozess. Normierung einer linearen Differentialgleichung. *Sylvester*²⁶³⁾ konstatiert (Nr. 16), dass, wenn

257) „Bruno“ p. 152.

258) „Gordan“ 2, § 2, bes. p. 26; vgl. *E. Pascal*, Nap. R. (2) 1 (1887), p. 200.

259) „Fondamenti“. Vgl. Nr. 9, Anm. 192. Die späteren Untersuchungen hat *Capelli* zusammengefasst in Math. Ann. 37 (1891), p. 1. S. „Inv.-Ber.“ p. 200.

260) Math. Ann. 37, p. 4. Über eine Anwendung auf die Hesse'sche Form H s. Nr. 27.

261) Nap. Atti (2) 1 (1888); Nap. Rend. (2) 2 (1888), p. 45, 189; ib. (2) 7 (1893), p. 29, 155; Gi. di mat. 32 (1894), p. 376 = Chic. Congr. P. 1896 (1893), p. 35.

262) In den Arbeiten von 1893/94 (l. c.) geht *Capelli* auch näher ein auf die Syzygien (Nr. 8) zwischen vertauschbaren Polaroperationen, auf „volle Systeme“ (Nr. 6) von solchen u. dgl.

263) Cambr. Dubl. m. J. 7 (1852), p. 179, 194 [vgl. *Boole* ib. 6 (1851), p. 96]. *Gordan*, s. Anm. 234.

in $F = F_m(x|a)$ jedes Potenzenprodukt $x_1^{e_1} x_2^{e_2} \dots x_n^{e_n}$ ersetzt wird durch $\frac{\partial^{e_1+e_2+\dots+e_n}}{\partial u_1^{e_1} \partial u_2^{e_2} \dots \partial u_n^{e_n}} \Phi(u|a)$, wo $\mu \geq m$, eine Kontravariante von F und Φ entsteht, die „ m^{te} Überschiebung“ (nach *Gordan*) $(F, \Phi)_m$. Speziell für $\mu = m$ resultiert die „bilineare Invariante“²⁶⁴⁾ $\sum p_i a_i \alpha_i$, wo die p_i die bez. Polynomalkoeffizienten sind. Sollen die p_i herausfallen, so hat man entweder eine der beiden Urformen F, Φ ohne p_i anzusetzen, oder aber²⁶⁵⁾ in beiden — dann „präpariert“ genannten, — die $\sqrt{p_i}$ als numerische Koeffizienten einzuführen (Nr. 16). Allgemeiner, wenn $F_{y^{(k)}}$, $\Phi_{v^{(k)}}$ die k^{ten} Polaren von $F = F_m(x|a)$, $\Phi = \Phi_\mu(u|\alpha)$ bez. (y) resp. (v) sind, und man sieht $F_{y^{(k)}}$, $\Phi_{v^{(k)}}$ als Urformen k^{ter} Ordnung resp. Klasse in (y) resp. (v) an, so ist nach *Sylvester*²⁶⁶⁾ $(F_{y^{(k)}}, \Phi_{v^{(k)}})_k$ eine Komitante von F, Φ , die *Gordan*²⁶⁷⁾ als „ k^{te} Überschiebung von F und Φ “ bezeichnet und zur Grundlage der Formentheorie gemacht hat. Schreibt man $F = a_x^m$, $\Phi = u_\alpha^\mu$, so wird $(F, \Phi)_k = a_x^{m-k} u_\alpha^{\mu-k} (a\alpha)^k$ i. e. „ $(F, \Phi)_k$ entsteht aus dem Produkte $F\Phi = a_x^m u_\alpha^\mu$, indem man k -mal ein Faktorenpaar $a_x u_\alpha$ durch den „Klammerfaktor“²⁶⁸⁾ $(a\alpha)$ ersetzt, oder wie *Gordan* sagt, $F\Phi$ k -mal „faltet.“²⁶⁸⁾ Man kann sich auch auf kogrediente Variablenreihen $(x), (y), (z), \dots$ beschränken²⁶⁹⁾; für 3 ternäre Urformen etwa $F_m = a_x^m$, $G_p = b_y^p$, $H_q = c_z^q$ wird $(F, G, H)_k = (abc)^k a_x^{m-k} b_y^{p-k} c_z^{q-k}$. Spezialisiert man, indem man $p = q$ und $b_y c_z$ als alternierende Form der y, z nimmt, so kehrt man zu $(F, \Phi)_k$ zurück. Andererseits liefert *Cayley's* Prozess (Nr. 12, Anm. 226) $\Omega = \left| \frac{\partial}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial y_2} \frac{\partial}{\partial z_3} \right|$, auf $a_x^m b_y^p c_z^q$ k -mal ausgeübt, bis auf einen Zahlenfaktor, gerade $(abc)^k a_x^{m-k} b_y^{p-k} c_z^{q-k}$ i. e.: „Der Prozess Ω^k , auf ein symbolisches (ternäres) Produkt $a_x^m b_y^p c_z^q$ ausgeübt, ist äquivalent der k -maligen Faltung des Produktes oder der k^{ten} Überschiebung der Formen a_x^m, b_y^p, c_z^q (und entspr. allgemein)“. Überschiebt man 2 Produkte binärer symbolischer Faktoren, so ergeben sich bei *Gordan*²⁷⁰⁾ analoge Sätze, wie beim Polarenprozess

264) Das Verschwinden der bilinearen Invariante ist eine Hauptquelle der Apolarität [Nr. 24].

265) *Clebsch*, Gött. Abh. 17 (1872), p. 14; *Sylvester*, J. f. Math. 85 (1878), p. 89 [Nr. 16].

266) S. Anm. 263. Implizite schon bei *Cayley* (Nr. 2, Anm. 17).

267) Für f_n im J. f. Math. 69 (1868), p. 323 (besondere Fälle in unsymbolischer Behandlung bei *Cayley*, IV. Mem.); für F_n : Math. Ann. 1 (1868), p. 90.

268) „Gordan“ 2, p. 33. Das Wort „Faltung“ im „Programm“. Für \bar{C}_n : *Gordan*, Math. Ann. 17 (1881), p. 217.

269) Nach *W. Fr. Meyer*, „Inv.-Ber.“ p. 206.

270) „Gordan“ 2, § 3; Math. Ann. 17 (1881), p. 217.

(Nr. 13); speziell wird jedes symbolische Produkt eine Summe einfacher, nur noch 2 Symbole enthaltender Überschiebungen. Eine häufige Überschiebung ist die „Funktionaldeterminante“²⁷¹⁾ $\left| \frac{\partial F^{(i)}}{\partial x_k} \right|$ von n Formen $F^{(i)}(x_1, x_2, x_n)$, die zur „Hesse'schen Determinante“²⁷²⁾ von G für $F^{(i)} = \frac{\partial G}{\partial x_i}$ wird.

Bei festem φ stellt $(f, \varphi)_k = 0$ eine lineare Differentialgleichung k^{ter} Ordnung $D_k = 0$ ²⁷³⁾ für $f = f(x) = f(x_1, x_2)$ dar. Umgekehrt lässt sich jedes (homogenisierte) D_k mit rationalen Koeffizienten als Aggregat von Überschiebungen einer Form f mit Formen φ schreiben. *E. Waelsch*²⁷³⁾

weist das nach, indem er in $D_k \equiv \sum_{r=0}^{r=k} \psi^{(r)} \frac{\partial^k y}{\partial x_1^r \partial x_2^{k-r}} = 0$ symbolisch $y = a_x^n$ setzt, und die Form $D_k(x_1, x_2; -a_2, a_1)$ nach Potenzen von a_x entwickelt (Nr. 17); für $n + v = m$ resultiert

$$D_k \equiv v_0(\varphi_m, f)_n + v_1(\varphi_{m-2}, f)_{n-1} + v_2(\varphi_{m-4}, f)_{n-2} + \dots = 0,$$

wo die φ gewisse Formen sind und über die numerischen v geeignet verfügt wird. Diese „Normierung“ von $D_k = 0$ ist für das Aufsuchen der ganz-rationalen²⁷⁴⁾ Lösungen spezieller Typen von $D_k = 0$ brauchbar. Vgl. Anm. 203. So haben *G. Pick*²⁷⁵⁾ und *F. Klein*²⁷⁶⁾ die „Lamé'sche Differentialgleichung“ untersucht; *Pick* die „gewöhnliche“ $(\varphi_4, f)_2 = \varphi_0 f$; *Klein* die „allgemeine“ $(\varphi_m, f)_2 = \varphi_{m-4} f$, die bei einer gewissen Ausartung von φ_m zur allgemeinen $D_2 = 0$ wird²⁷⁷⁾.

Deutet man mit *E. Waelsch*²⁷⁸⁾ in der normierten $D_k = 0$ f als

271) Vgl. I B 1 b, Nr. 17, 19, 21.

272) Vgl. I B 1 b, Nr. 22.

273) Prag Deutsche Math. Ges. 1892, p. 78.

274) *Hilbert*, Diss. Königsb. 1885; Math. Ann. 28 (1887), p. 381; 30 (1887), p. 15; *R. Perrin*, Par. Soc. Math. Bull. 16 (1888), p. 82; *A. Hirsch*, Diss. Königsb. 1892.

275) Wien. Ber. 96 (1887), p. 872; Math. Ann. 38 (1891), p. 139.

276) Gött. Nachr. 1890, p. 85; Math. Ann. 38 (1891), p. 144; „Über lineare Differentialgleichungen 2. Ordnung“. Autogr. Vorl., Göttingen 1890/91, 1894.

277) Wegen einer damit zusammenhängenden Verallgemeinerung des Überschiebungsbegriffes durch *Pick* s. Anm. 285. Zur Normierung der D_n vgl. noch *M. Böcher*, Göttinger Preiarbeit 1891, ausführlicher in „Über die Reihen der Potentialtheorie“, Leipzig 1893; *G. Fano*, Rom. Linc. R. (5) 4 (1895), p. 18, 51, 232, 292, 322.

278) Anschliessend hat *Waelsch*, bes. für den Fall der f_s , Zusammenhänge studiert zwischen den Lamé'schen Formen, den Schwesterformen (Nr. 7), den Raumkurven und Flächen 3. Ordnung, mit Ausblicken auf eine allgemeine „Binäranalyse höherer Räume“ (Nr. 24, Anm. 388 u. Nr. 27, Anm. 440); Monatsh. f. Math. 6 (1895), p. 261, 375; Wien. Ber. 105 (1896), p. 741; Deutsche Math.-Ver. 4 (1897), p. 113.

eine *wirkliche* Form $f_\pi (\pi \geq n)$, wodurch D_k in eine Form d_μ übergeht, so gewinnt man eine für die Geometrie nützliche projektive Zuordnung von Formen f_π und d_μ .

15. Substitution einseitiger Ableitungen. Die Normierung von $D_k = 0$ (Nr. 14) ist auch durch einen — überhaupt für die Formentheorie grundlegenden — Satz erreichbar, den *Bruno*²⁷⁹⁾ für Urformen f , *Hilbert*²⁸⁰⁾ und *Perrin*²⁸¹⁾ allgemein für F aufgestellt haben. Man nehme in der Urform $f = f_n(x|a) = f^{(0)}(x)$ $x_2 = 1$, setze $f^{(1)} = \frac{1}{n} f'(x)$, $f^{(2)} = \frac{1}{n(n-1)} f''(x)$ etc., „so ist, für $c_0(a_i)$ als Leitglied (Nr. 23) einer Kovariante c von f , $c = c_0(f^{(2)})$ “, i. e. jede isobare (Nr. 18) Form der $f^{(i)}$ vom Gewichte p und vom Grade g , die der Bedingung $D \equiv f^{(0)} \frac{\partial}{\partial f^{(1)}} + 2 f^{(1)} \frac{\partial}{\partial f^{(2)}} + \dots = 0$ genügt, ist eine Kovariante von f der Ordnung $m = ng - 2p$. Der Satz ist plausibel, da c durch Überschiebungen aus f entsteht (Nr. 14), also eine Form der $f^{(i)}$ wird, die für $x_2 = 0$ die nämliche Form c_0 der a_i wird. Der Satz macht ausgeartete²⁸²⁾ Urformen zugänglich. *Hilbert*²⁸³⁾ hat damit die endlichen hypergeometrischen Reihen $f(\alpha, \beta, \gamma, x)$ invariantiv fixiert; — α (resp. — β) ist die Ordnung von f . Die $D_2 = 0$ für f wird normiert in $(\varphi_3, f)_2 + (\varphi_1, f)_1 = 0$; hier sind φ_3, φ_1 einfache Hülfsformen, nach deren Elimination f durch $\gamma \equiv 0$, wo γ eine gewisse Kovariante, charakterisierbar ist. Für $\Delta = n f^{(1)} \frac{\partial}{\partial f^{(0)}} + (n-1) f^{(2)} \frac{\partial}{\partial f^{(1)}} + \dots$ wird, wenn c_0 wieder eine isobare Form der $f^{(i)}$, $\Delta c_0 = \frac{d c_0}{d x}$. Zwischen

279) J. f. Math. 90 (1880), p. 186; Amer. J. of Math. 3 (1880), p. 154; Math. Ann. 18 (1881), p. 280. Vgl. *Sylvester*, Amer. J. of Math. 2 (1879), p. 357; *E. Stroh*, Math. Ann. 22 (1885), p. 402. Der Satz von *Bruno* erscheint bei *J. Wellstein*, Nova Acta Leop. 74 (1899), p. 281 (§ 2) [Auszug in Math. Ann. 52, p. 70] als Spezialfall eines Satzes über die (binären) Schwesterformen (Nr. 7, Anm. 146). Eine andere Anwendung der f_i giebt *A. B. Kempe*, Lond. Math. S. Proc. 24 (1893), p. 97: eine Seminvariante (Nr. 23) von f ist eine Simultaninvariante der f_i , vgl. noch *Elliott*, Mess. (2) 23 (1893), p. 91; Lond. Math. S. Proc. 26 (1895), p. 185.

280) Diss. Königsb. 1885; Math. Ann. 30 (1887), p. 15. In anderer Form erscheint die Verallgemeinerung schon bei *H. Grassmann*, Math. Ann. 7 (1874), p. 538 (Anm. 146). — Der Fall $f(x) = 0$ bei *Brioschi* behufs Transf. d. Gl.: Math. Ann. 29 (1887), p. 327.

281) Par. Soc. Math. Bull. 16 (1888), p. 82.

282) Math. Ann. 30 (1887), p. 21 (Nr. 14, Anm. 274). — In allgemeinerer Gestalt tritt der Satz $\Delta c_0 = \frac{d c_0}{d x}$ bei den Differentialinvarianten auf, s. Nr. 20, Anm. 326.

D, Δ und deren Iterationen herrschen einfache Rekursionsgesetze. Eine isobare Form φ der $f^{(i)}$ ist eine „Semikovariante“²⁸³⁾ vom Range r , wenn in der Reihe $D\varphi, D\varphi^2, \dots$ zuerst $D\varphi^{r+1} \equiv 0$ ist; für $r=0$ resultiert die Kovariante. φ kann vermöge der D, Δ aus Kovarianten erzeugt werden; es führt das zu einer Verallgemeinerung²⁸⁴⁾ des Überschiebungsprozesses²⁸⁵⁾.

16. Substitution homogener Ableitungen. *G. Boole*²⁸⁶⁾ bemerkt, dass die S vom Modul Δ , die x_1, x_2 überführt in x'_1, x'_2 , auch $\frac{\partial}{\partial x_2}, -\frac{\partial}{\partial x_1}$, angewandt auf eine willkürliche Funktion χ , überführt in $\frac{1}{\Delta} \frac{\partial}{\partial x'_2}, -\frac{1}{\Delta} \frac{\partial}{\partial x'_1}$, i. e. dass die x_1, x_2 mit den $\frac{\partial}{\partial x_2}, -\frac{\partial}{\partial x_1}$ kogredient sind, was sich unschwer auf die höheren Ableitungen von χ ausdehnen lässt. Aus einer Identität $\varphi(x_1, x_2) \equiv \psi(x'_1, x'_2)$ folgt daher symbolisch $\varphi\left(\frac{\partial}{\partial x_2}, -\frac{\partial}{\partial x_1}\right) \equiv \psi\left(\frac{1}{\Delta} \frac{\partial}{\partial x'_2}, -\frac{1}{\Delta} \frac{\partial}{\partial x'_1}\right)$, so dass jedes Produkt $\left(\frac{\partial}{\partial x_1}\right)^{k_1} \left(\frac{\partial}{\partial x_2}\right)^{k_2}$ durch $\frac{\partial^{k_1+k_2}}{\partial x_1^{k_1} \partial x_2^{k_2}}$ zu ersetzen ist. Das ist bereits der Überschiebungsprozess (Nr. 14). Ist S eine orthogonale²⁸⁷⁾ Substitution von x_1, x_2, x_3 , so folgt aus $\varphi(x_1, x_2, x_3) \equiv \psi(x'_1, x'_2, x'_3)$ symbolisch $\varphi\left(\frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}, \frac{\partial}{\partial x_3}\right) \equiv \psi\left(\frac{\partial}{\partial x'_1}, \frac{\partial}{\partial x'_2}, \frac{\partial}{\partial x'_3}\right)$; Kogredienz und Kontragredienz fallen hier zusammen.

*J. J. Sylvester*²⁸⁸⁾ dehnt das Prinzip „der gegenseitigen Differentiation“ auf n Variable x_1, x_2, \dots, x_n aus, die bequemer einer „unimodularen“ S ($\Delta = 1$) unterworfen werden, während die n kontragredienten Variablen u_1, u_2, \dots, u_n invers (reciprok) transformiert

283) Vgl. die verwandten Begriffsbildungen von *J. Deruyts* in Nr. 23.

284) Bei *R. Perrin* finden sich Ausdehnungen der Hilbert'schen Sätze und Begriffe auf höhere Gebiete Par. S. M. Bull. 16 (1888), p. 82.

285) Vgl. Anm. 277. Eine andersartige Erweiterung des Überschiebungsprozesses, auf Gebilde $p > 0$, findet sich bei *Pick*, Gött. Nachr. 1894, p. 311; Math. Ann. 50 (1898), p. 381. Verwandte Untersuchungen stellt *J. Wellstein* an, s. Anm. 277.

286) Cambr. math. J. 3 (1842), p. 106; ausführlicher in Cambr. Dubl. m. J. 6 (1851), p. 87.

287) Anwendungen von diesen und analogen Sätzen auf Fragen der mathematischen Physik geben *W. J. M. Rankine* und *W. Thomson*, Lond. Trans. 146^{1, 2} (1856); *C. Niven*, Edinb. Trans. 27 (1876), p. 423; *W. J. C. Sharp*, Lond. Math. S. Proc. 13 (1882), p. 216; *B. Élie*, Thèse Bordeaux 1892; *H. Burkhardt* (vgl. auch Nr. 6, 20), Gött. Nachr. 1893, p. 155; Math. Ann. 43 (1893), p. 197; Deutsche Math.-Ver. 5 (1897), p. 42; *C. Somigliana*, Rom. Linc. R. (5) 4¹ (1895) p. 25.

288) Cambr. Dubl. M. J. 7 (1872), p. 179.

werden, sodass u_x ungeändert bleibt (Nr. 2). Dann sind die x und $\frac{\partial}{\partial u_i}$, wie die u_i und $\frac{\partial}{\partial x_i}$ kogredient, und aus $\varphi(x_i) \equiv \psi(x_i')$ folgt symbolisch $\varphi\left(\frac{\partial}{\partial x_i}\right) \equiv \psi\left(\frac{\partial}{\partial u_i}\right)$ (Nr. 14). *Sylvester* betont²⁸⁹, dass diese Identität auch in *realem* Sinne gültig bleibt. In der Anwendung auf die Formentheorie lautet das Prinzip: „Sind $F(x_i)$, $\Phi(u_i)$ 2 Urformen, so sind, symbolisch und unsymbolisch, $F\left(\frac{\partial \Phi}{\partial u_i}\right)$, $\Phi\left(\frac{\partial F}{\partial x_i}\right)$ simultane Komitanten von F , Φ , und das bleibt richtig, wenn die Zeichen F , Φ vor den Klammern durch die von 2 beliebigen Komitanten von F , Φ ersetzt werden, wo F , Φ die x , u auch zugleich enthalten dürfen.“

Zu einer andern Art von Differentiationsprinzip gelangt man nach *Sylvester*²⁹⁰), wenn man eine Invariante J von $F_m(x|a) + kw_x^m$ nach Potenzen von k entwickelt, deren Faktoren dann Kontravarianten von F sind. Es erzeugt also der „Evektantenprozess“ $E = u_1^m \frac{\partial}{\partial a_1} + u_1^{m-1} u_2 \frac{\partial}{\partial a_2} + \dots$, nebst seinen Iterationen, aus J Kontravarianten (allgemeiner Komitanten) von F , die successiven „Evektanten“. Ist J speziell die Diskriminante von F , so gelangt man zu den vorher von *Hermite* entdeckten „adjungierten Formen“ (Nr. 2, 3, 18). — $F(x|a)$ sei eine „präparierte“ Urform (Anm. 265). Dann inducieren, wie *Sylvester*²⁹¹) successive für $n = 2, 3, \dots$ nachweist, 2 reciproke S der x 2 reciproke S der a . Ist also $C(x|a)$ eine Kovariante, $\Gamma(u|a)$ eine Kontravariante von F , so ist auch $C\left(u \left| \frac{\partial \Gamma}{\partial a} \right. \right)$ eine Kontravariante. Ähnlich geht aus 2 Kovarianten eine neue Kovariante hervor. Der Prozess ist auf die Leitglieder übertragbar (Nr. 23). *R. Lipschitz*²⁹²) beweist den Satz von *Sylvester* direkt, indem er ihn in Beziehung setzt zu dem analogen, dass auch 2 transponierte S der x 2 transponierte S der a nach sich ziehen. Das letztere wird von *Study*²⁹³) auf Konnexen $F(x; u; |a)$, $\Phi(x; u; |b)$

289) l. c. p. 194.

290) l. c. p. 56, 181.

291) J. f. Math. 85 (1878), p. 89.

292) Amer. J. 1 (1878), p. 336; vgl. *Sylvester* ib., p. 341. Der Satz über die transpon. Subst. symb. bewiesen bei *C. le Paige*, Math. Ann. 15 (1879), p. 206. *F. Franklin* vergleicht die Wurzeln der charakteristischen Gleichung der inducierten S mit denen der char. Gl. der ursprünglichen S : Amer. J. of Math. 16 (1894), p. 205.

293) „Study“ p. 36. S. Anm. **) auf p. 220 des „Inv.-Ber.“.

ausgedehnt, wo man die Dualität als den inneren Grund erkennt; denn $\sum a_i b_i$ ist genau so als identische Komitante aufzufassen, wie $\sum x_i u_i$. Es sind also auch die $\frac{\partial}{\partial a}$ zu den b kogredient, was zum Evektantenprozess für Konnexionen führt.

A. Hurwitz²⁹⁴) erweitert und vervollständigt die Boole-Sylvester-Cayley'schen Differentiationsprozesse unter dem Gesichtspunkt des Rechnens mit Substitutionen; eine bemerkenswerte Anwendung davon ist die Ausdehnung des Hermite'schen Reciprozitätsgesetzes (Anm. 233^a) auf höhere Gebiete; es gelingt, aus den Invarianten eines beliebigen Formensystems Invarianten eines zweiten, aus ebensoviel beliebigen Formen bestehenden Systems abzuleiten, so, dass einem vollständigen System linear unabhängiger Invarianten dort stets ein ebensolches hier entspricht und umgekehrt.

17. Reihenentwicklungen. Ist $f(x; y)$ eine doppelt binäre Form, und lässt man in die Prozesse $D_{xy} = \Delta$, $D_{yx} = D$, Ω (Nr. 13, 14) noch Zahlenfaktoren eingehen: $m\Delta = y_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + y_2 \frac{\partial}{\partial x_2}$, $nD = x_1 \frac{\partial}{\partial y_1} + x_2 \frac{\partial}{\partial y_2}$, $mn\Omega = \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial y_2} - \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial y_1}$, so hat man sofort nach Clebsch²⁹⁵) und Gordan $f = \Delta Df + \frac{m}{m+1} (xy)\Omega f$, und durch Iteration die (endliche) „Reihenentwicklung“²⁹⁶) von f nach Potenzen von (xy)

I. $f \equiv \Delta^n D^n f + \alpha_1 (xy) \Delta^{n-1} D^{n-1} \Omega f + \alpha_2 (xy)^2 \Delta^{n-2} D^{n-2} \Omega^2 f + \dots$, wo die $D^n f$, $D^{n-1} \Omega f$, $D^{n-2} \Omega^2 f$, ... nur noch von den (x) abhängen, und die α numerisch sind; umgekehrt giebt es keine zweite Entwicklung von f nach Potenzen von (xy) mit Koeffizienten, die Polaren von Formen der (x) sind. Schreibt man $f = r_x^m s_y^n$ (Nr. 12), und bildet die „Elementarkovarianten“ $E_i = (rs)^i r_x^{m-i} s_y^{n-i}$ ($i = 0, 1, \dots$), so sind die Glieder der rechten Seite von I. die n^{te} , $(n-1)^{\text{te}}$, ... Überschiebung von E_0, E_1, \dots mit $(xy)^n$. Mithin ist $f(x; y)$ hinsichtlich des Systems der invarianten Formen ersetzbar durch die E . — Clebsch²⁹⁷) leitet direkt aus I. eine analoge Formel ab für eine doppelt-

294) Math. Ann. 45 (1894), p. 381.

295) „Clebsch“ § 7.

296) „Gordan“ 2, § 7, bes. p. 23. Vgl. die Darstellung bei H. S. Baker, Mess. (2) 19 (1889), p. 91. Die Formel I. lässt sich in gewissem Sinne nach Gordan als Erweiterung der Taylor'schen Reihe ansehen.

297) Gött. Abh. 17, p. 22; Gordan, Math. Ann. 5 (1872), p. 95. Der Begriff der „reducierten“ Urformen lässt Modifikationen zu (Beispiele bei Forsyth, Quart. J. 23 [1888], p. 102). Anwendung auf volle Systeme für F_n , unter Benützung des Ω -Prozesses, bei F. Mertens, Wien. Ber. 98 (1889), p. 691.

ν -äre Form r_ξ ; man spezialisiere f zu $x_1^m \cdot y_2^n$ und setze $x_1 = r_\xi$, $y_1 = r_\eta$, $x_2 = s_\xi$, $y_2 = s_\eta$, mithin $(xy) = r_\xi s_\eta - r_\eta s_\xi$. Hieraus folgert *Clebsch*, dass eine Reihe von Urformen $F(x_1, \dots, x_r, y_1, \dots, y_r$ etc.) hinsichtlich ihrer Komitanten ersetzbar ist durch eine einfachere Reihe von Urformen G , die von jeder Art von „Zwischenvariablen“²⁹⁸⁾

$x_i, p_{ik} = x_i y_k - x_k y_i, p_{ikl} = \sum \pm x_i y_k z_l$ etc. höchstens je eine Reihe enthält. Die G können noch „reduziert“ werden, d. i. den Bedingungen

$$\sum \frac{\partial^2}{\partial p_{ikl} \dots \partial p_{kr'v' \dots}} = 0 \text{ unterworfen werden, wo sich die } p_{ikl} \dots,$$

$p_{kr'v' \dots}$ dualistisch gegenüberstehen. — Bei *Gordan*²⁹⁹⁾ dient die Reihenentwicklung als Hauptmittel der symbolischen Rechnung (Nr. 13, 14). *Capelli*³⁰⁰⁾ verdankt man die Ausdehnung auf Formen F mit kogredienten Reihen von ν Variablen. Die Reihen gehören nicht sowohl der Formentheorie, als der spezifischen Theorie der Polarenprozesse D_{xy} an (Nr. 13). — Der Unterfall der „Konnexe“

$F(x; u) = \alpha_x^m u_\alpha^\mu$ erlaubt nach *Gordan*³⁰¹⁾ und *E. Study*³⁰²⁾ eine direktere Behandlung. Ist $\Delta^* F = (\alpha\alpha)^* \alpha_x^{m-*} u_\alpha^{\mu-*}$ die α^{to} Überschie-

bung von F mit sich (Nr. 14), so ist $G_0(x; u) \equiv F + \alpha_1 u_x \Delta F + \alpha_2 u_x^2 \Delta^2 F + \dots$ bei numerischen α eine in den Koeffizienten von F lineare Komitante von F . Die α sind eindeutig so bestimmbar,

dass $\Delta G_0 \equiv \sum \frac{\partial^2 G_0}{\partial x_i \partial u_i} \equiv 0$, i. e. G_0 ein „Normalkonnex“ wird.

successive auf $F, \Delta F, \Delta^2 F, \dots$ angewandt, liefert das Verfahren die „Elementarkonnexe“ G_0, G_1, G_2, \dots . Dann lassen sich die numerischen β eindeutig so bestimmen, dass

$$\text{II.} \quad F \equiv G_0 + \beta_1 u_x G_1 + \beta_2 u_x^2 G_2 + \dots$$

wird. Die Koeffizienten der G_i sind — bis auf die Bedingungen $\Delta G_i \equiv 0$ — von einander unabhängig. Nennt man mit *Rosanes*³⁰³⁾ die Konnexionen

298) l. c. § 12. *J. Deruyts* untersucht entsprechend Formen mit mehreren verschiedenen Reihen der $p_i, p_{ik}, p_{ikl} \dots$; die Invarianten solcher Formen werden reduciert auf einfachere, die von jeder Art von Variablen höchstens eine Reihe enthalten; *Brux. Bull.* (3) 25 (1893), p. 450 (Nr. 18, 23).

299) Für C_n bei „Study“ 2, § 3. Vgl. Nr. 5 Anm. 105.

300) Für C_n : *G. di mat.* 18 (1880), p. 17. Allgemein „Fondamenti“; *Pal. Rend.* 1 (1886), p. 1; *Math. Ann.* 37 (1891), p. 1; *Rom. Linc. R.* 1 (1891), p. 161 8 (1892), p. 3.

301) *Math. Ann.* 5 (1872), p. 94, bes. § 4, 5.

302) „Study“ 2, §§ 3, 8, 12. *St.* bezeichnet die Formeln I., II. als „Erste“ bzw. „Zweite Gordan'sche Reihenentwicklung“.

303) *J. f. Math.* 75 (1873), p. 172; 76 (1873), p. 312; *Math. Ann.* 6 (1873) p. 264 [Nr. 24, Anm. 373].

$F = a_x^m u_x^\mu$, $\Phi = b_x^\mu u_\beta^\mu$ „konjugiert“, wenn $(F, \Phi) \equiv a_\beta^m b_\alpha^\mu = 0$, und entwickelt auch $\Phi = \Gamma_0 + b_1 u_x \Gamma_1 + \dots$, so ist stets $u_x^i G_i$ konjugiert zu $u_x^k \Gamma_k$ ($i \geq k$). Analoge Entwicklungen gelten für Formen $F = a_x^m b_x^n$. — *Study*³⁰⁴) hat den Reihenentwicklungen eine begriffliche Deutung gegeben, auf Grund der Eigenschaften, die die Mannigfaltigkeit der S -Koeffizienten besitzt³⁰⁵).

18. Differentialgleichungen der Komitanten. Als Ausfluss eines verallgemeinerten Satzes über Unterdeterminanten (Nr. 2, Anm. 17; 12, Anm. 224) erscheint bei *Cayley*³⁰⁶) die Existenz linearer partieller Differentialgleichungen für die Hyperdeterminanten. — *Sylvester*, *Cayley*, *Aronhold* haben fast gleichzeitig³⁰⁷) die charakteristischen linearen partiellen Differentialgleichungen für die einfacheren Komitanten — die noch die x und u enthalten können — von Urformen aufgestellt. — *Sylvester*³⁰⁸) bedient sich hierbei, als Vorgänger *Lie*'s, des allgemeinen Prinzips der „infinitesimalen Variation“ der Variabeln. Ist etwa $i(a)$ eine Invariante von $f_n(x|a)$, so bediene man sich der $S, S_1: x_1' = x_1 + \varepsilon x_2$ (ε unendlich klein), $x_2' = x_2$, resp. der andern, $S_2: x_1' = x_1$, $x_2' = \varepsilon x_1 + x_2$. Setzt man in $i(a)$ die transformierten a' ein, und entwickelt nach Potenzen von ε , so liefert das Verschwinden des Faktors von ε die beiden Gleichungen für binäre Invarianten i :

$$\text{I. } \begin{cases} Di \equiv a_0 \frac{\partial i}{\partial a_1} + 2a_1 \frac{\partial i}{\partial a_2} + 3a_2 \frac{\partial i}{\partial a_3} + \dots = 0, \\ \Delta i \equiv a_n \frac{\partial i}{\partial a_{n-1}} + 2a_{n-1} \frac{\partial i}{\partial a_{n-2}} + 3a_{n-2} \frac{\partial i}{\partial a_{n-3}} + \dots = 0. \end{cases}$$

Dass diese i als Invariante von f charakterisieren, erhellt aus der Zu-

304) l. c. § 12.

305) Vgl. dazu „Lie-Scheffers“, Kont. Transformationsgruppen, Kap. 23.

306) Cambr. math. J. 4 (1845), p. 193 = Pap. 1, p. 80.

307) Vgl. die Bemerkungen von *Sylvester*, Cambr. Dubl. m. J. 7 (1852), p. 205 und von *Cayley*, Coll. Pap. 2 (1889), p. 600. Die systematischen Darstellungen finden sich bei *Sylvester*, Cambr. Dubl. m. J. 7 (1852) sect. 6, p. 204; bei *Cayley* im I. und II. memoir und J. f. Math. 47 (1854), p. 109 = Pap. 2, p. 164; vgl. *Brioschi*, Ann. di mat. 1 (1858), p. 160; Ann. fis. mat. 9 (1859), p. 82; bei *Aronhold*, J. f. Math. 62 (1863), p. 281. Letzterer stellt die Differentialgleichungen in allgemeinsten Gestalt auf und beweist, dass sie die invarianten Bildungen charakterisieren. *Sylvester* giebt in Cambr. Dubl. m. J. 8 (1853), p. 256 die Differentialgleichungen für die Kombinantanten (Nr. 24); vgl. *E. Betti*, Ann. di mat. 1 (1858), p. 344. Bez. der Diff. Gleichungen für die Seminvarianten s. Nr. 23, für die Reciprokanten Nr. 20.

308) Cambr. Dubl. m. J. 7 (1852), p. 96, 204 (sect. 6). Vgl. „Lie-Scheffers“, Kap. 23.

sammensetzbarkeit einer beliebigen (unimodularen) S aus S_1 und S_2 . Ist i eine Kovariante von f , so erleidet i eine leicht angebbare Modifikation. Cayley³⁰⁹⁾ der die Differentialgleichungen zur Grundlage seiner „memoirs“ macht, geht anders vor. Für eine Urform $f_n(x|a) = f$ lässt sich $x_2 \frac{\partial f}{\partial x_1}$ auch durch Differentiation nach den x erhalten, nämlich durch den Prozess $\left\{x_2 \frac{\partial f}{\partial x_1}\right\} \equiv Df$. Mithin ist $\left\{x_2 \frac{\partial}{\partial x_1}\right\} - x_2 \frac{\partial}{\partial x_1}$ ein „Annihilator“ von f , d. h. er macht f zu Null und desgl. $\left\{x_1 \frac{\partial}{\partial x_2}\right\} - x_1 \frac{\partial}{\partial x_2} \equiv \Delta - x_1 \frac{\partial}{\partial x_2}$. Bei x_1, x_2, \dots, x_n hat man $\frac{n(n-1)}{2}$ analoge Operatoren $\left\{x_i \frac{\partial}{\partial x_k}\right\} - x_i \frac{\partial}{\partial x_k}$. Aber auch jede Kovariante genügt diesen Differentialgleichungen, und umgekehrt. — Die Ausdehnung auf eine Reihe von Urformen und mehrere Variablenreihen (x) resp. (u) ist unschwer vorzunehmen.

Mittelst des Poisson'schen „Klammerausdrucks“³¹⁰⁾ zeigt Cayley, dass eine Invariante i von $f(x|a)$ „isobar“ ist, d. h. wenn $\text{const. } a_0^{\alpha_0} a_1^{\alpha_1} \dots a_n^{\alpha_n}$ ein Term von i ist, und g der Grad in den a , so ist das „Gewicht“ $w = \sum i \alpha_i = \frac{1}{2} ng$ konstant; nach Ausübung von S mit dem Modul Δ ändert sich i um den Faktor Δ^w [Nr. 2]. Ist c eine Kovariante von der Ordnung μ und vom Grade g bilden die Gewichte der Koeffizienten eine arithmetische Reihe mit der Differenz 1 und $w = \frac{1}{2}(ng + \mu)$ wird das „Gewicht“ von c .

$S. Roberts$ ³¹¹⁾ hat in die Differentialgleichungen für i resp. c die Wurzeln von f als unabhängige Variable eingeführt. Aronhold³¹²⁾ leitet n^2 Differentialgleichungen für eine absolute, wie relative Invariante J einer Urform $F(x|a)$ aus seinem „Äquivalenzproblem“ (Nr. 2, 4) vermöge Elimination her; von den n^2 Gleichungen sind $\frac{n(n-1)}{2}$ mit den früheren äquivalent, während die übrigen nur aussagen, dass J in den a homogen und isobar ist. Beide Gleichungssysteme sind

309) Vgl. die Bemerkungen von Cayley, Coll. Pap. 2 (1889), p. 600 (Anhang).

310) I. Mem. Vgl. „Lie-Scheffers“, Kap. 23.

311) Ann. fis. mat. 5 (1854), p. 409; Br. stellt ib. p. 422 ein System von part. Differentialgleichungen für die symmetrischen Funktionen von n Grössen auf, das später von E. Netto eingehend diskutiert ist: Zeitschr. Math. Phys. 38 (1893) p. 357; 40 (1895), p. 375 [I B 3 b, Nr. 8]. Wegen der Leistungen Brioschi's s. Noether Math. Ann. 50 (1898), p. 477.

312) J. f. Math. 62 (1863), p. 281.

je linear unabhängig, und bilden nach *Clebsch*³¹³⁾ ein „vollständiges System“, d. h. durch Differentiation und Elimination lassen sich keine neuen Gleichungen gewinnen. Im Sinne von *Lie*³¹⁴⁾ sagt das aus, dass die „infinitesimalen“ S der α , die J gestattet, eine Gruppe bilden.

*A. R. Forsyth*³¹⁵⁾ stellt die Differentialgleichungen auf für eine Komitante C einer Urform $F(x_1, \dots, x_n | a)$, wo C von allen $p_{ikl\dots}$ (Nr. 17, Anm. 298) je eine Reihe enthalten darf. Indem er, wie *Sylvester*, „infinitesimale“ S zu Grunde legt, gelangt er z. B. für $n = 4$ zu 6 Gleichungen des Typus:

$$\sum i a_{i-1, k+1, l, m} \frac{\partial C}{\partial a_{iklm}} = x_1 \frac{\partial C}{\partial x_2} + p_{14} \frac{\partial C}{\partial p_{24}} - p_{31} \frac{\partial C}{\partial p_{25}} - u_3 \frac{\partial C}{\partial u_1} = 0,$$

die einfache Modifikationen erleidet, wenn F die $p_{ikl\dots}$ selbst noch enthält.

*Study*³¹⁶⁾ hat, an *Gordan* anknüpfend (Nr. 13, Anm. 258) erkannt, dass gewissen Zusammenfassungen der Differentialgleichungen für J eine formentheoretische Bedeutung zukommt, dadurch, dass er jeder infinitesimalen S der x eine endliche S (mit $\Delta = 0$) eindeutig umkehrbar zuordnet. Eine gewisse Evektante (Nr. 16, Anm. 290) von J unterscheidet sich dann von Fu_x nur um einen Zahlfaktor. Hierbei haben die ganz-rationalen J nichts mehr vor den rationalen resp. algebraischen resp. analytischen voraus. Die Anzahl der Differentialgleichungen lässt sich „reduzieren“³¹⁷⁾, insofern aus zweien vermöge des „Klammerprozesses“ (Nr. 12, Anm. 238 und II A 6) die übrigen hervorgehen. *Kronecker*³¹⁸⁾ reduziert anders; er setzt die allgemeine S von x_1, \dots, x_n aus einfacheren, bei denen jeweils nur 2 x Teil nehmen, zusammen. *Kronecker* gelangt so zu $2n - 2$ „Dekompositionssystemen“ $S^{(i)}$ mit numerischen Koeffizienten; die $2n - 2$ bez. Differentialgleichungen (für absolute J tritt noch eine weitere hinzu) sagen aus, dass J bei $S^{(i)}$ invariant bleibt und, indem sie

313) J. f. Math. 65 (1865), p. 257. Vgl. II A 5a, 6.

314) *Lie-Scheffers*, Kontin. Transformationsgruppen, Kap. 23 (Anm. 316).

315) Lond. Math. S. Proc. 19 (1888), p. 24. In besonderen Fällen schon bei *Capelli*, „Fondamenti“. — Die Reduktion des allgemeineren Falles, wo C von jeder Art von p mehrere Reihen enthalten darf, auf den Fall des Textes führt *J. Deruyts* aus, Brux. Bull. (3) 25 (1893), p. 450 [Anm. 298].

316) „Study“ 2, § 18 (Anm. 255, 314).

317) Nach „Study“ § 15 ist für $n = 3$ die Minimalzahl unabhängiger Differentialgleichungen gleich 2. *Kronecker* behandelt den Gegenstand substitutionentheoretisch Berl. Ber. 1889, p. 504 = Werke 3, p. 315.

318) Berl. Ber. 1889, p. 349, 479, 603 = Werke 3, p. 293, 315. Wegen der verwandten Untersuchungen von *J. Deruyts* s. Nr. 23.

das Kriterium für eine Invariante darstellen, geben sie Aufschluss über die inneren Beziehungen zwischen *Aronhold's* Gleichungen. Die Differentialgleichungen sind praktisch³¹⁹⁾ für die Berechnung der Invarianten nützlich, theoretisch³²⁰⁾ für unsymbolische Beweise wichtig.

19. Höhere Transformationen³²¹⁾. *Gordan*³²²⁾ hat die Formeltheorie der binären rationalen Transformation T auf die projektive Theorie zurückgebracht. Auf die Urform $f_n(x, 1)$ wird die $T_m: z$ $= \varphi_m(x, 1)$, $z_2 = \psi_m(x, 1)$ ausgeübt, indem man die Resultante $f(\varphi, \psi)$ (bez. x) von f und $z_1\psi - z_2\varphi$ bildet. Man hat die In- und Kovariante der „transformierten“ Urform $f^{(1)}$ durch simultane Formen der f, φ, ψ auszudrücken, oder auch von f und der Kombinate (Nr. 24) $\vartheta(x, y) = \varphi(x)\psi(y) - \varphi(y)\psi(x)$; umgekehrt ist eine solche Simultanform erst dann eine Komitante von $f^{(1)}$, wenn sie noch „gewissen partielle Differentialgleichungen genügt, die *Clebsch*³²³⁾ aufgestellt und als vollständiges System (Nr. 18, Anm. 313) charakterisiert hat.

319) Wegen der Anwendungen s. die Memoirs von *Cayley*; *Netto*, Zeitsch. Math. Phys. 38 (1893), p. 357; 40 (1895), p. 375, sowie die Lehrbücher, bes. „*Elliott*“. — Analoge Eigenschaften kommen den Differentialgleichungen der symmetrischen Funktionen zu, s. I B 3 b, Nr. 8, 9, 24, 25.

320) Durch die Untersuchungen von *Hilbert* (Nr. 6) ist dagegen der arithmetische Gesichtspunkt in den Vordergrund gerückt worden.

321) Wegen der invarianten Gestaltung der Tschirnhausen-Transformation durch *Hermite* s. Nr. 7, Anm. 147. *Brioschi* hat für die Koeffizienten der transformierten Gleichung part. Differentialgleichungen aufgestellt, Lomb. Ist. A. (1858), p. 231; die Potenzsummen der Wurzeln der transf. Gl. stellt er durch simult. Invarianten von f_n und gewissen f_{n-2} dar: Par. C. R. 124 (1897), p. 661. — *Klein* bezieht die Tschirnhausen-Transf. auf ein „typisches“ Koordinatensystem, s. z. B. „*Ikosäeder*“ Abschn. 2, Kap. 2. — Im besondern setzt man $z = g(x, 1)/f'(x, 1)$, so geht $f(x, 1) = f_n$ über in eine Form $F'_n(z, 1)$, deren Koeffizienten Invarianten sind, falls g eine Kovariante der Ordnung $n-1$ von f ist: *Hermite*, Par. C. R. 1865; *J. Rahts*, Math. Ann. 28 (1886), p. 387. Bei „*Bruno*“ p. 191 ist f_n selbst eine Kovariante von f (Einschränkungen bei *J. Junker*, Diss. Freiburg 1887). *Brioschi* reduziert *Hermite's* Ergebnisse auf den Fall, dass eine Wurzel von f substituiert wird (Nr. 15, Anm. 280), Math. Ann. 29 (1887), p. 327; Ann. di mat. (2) 16 (1888), p. 181, 329; Lond. Math. S. Proc. 20 (1889), p. 127, und normiert so die hyperelliptischen Integrale: Rom. Linc. I (5) 4¹ (1895), p. 363.

322) J. f. Math. 71 (1870), p. 164. $\vartheta(x, y)$ ist die erzeugende Funktion der Kombinenten von φ und ψ . *Cayley* führt die quadratische Transf. einer f_4 durch, Math. Ann. 3 (1871), p. 359 = Pap. 8, p. 398.

323) Gött. Abh. 15 (1870), p. 65. Die kubische Transf. einer f_3 (u. a.) lässt sich unmittelbar auf eine lineare zurückführen; vgl. noch *G. Torelli*, Nap. Acc. P. A. 11 (1888), p. 215; Pal. R. 2 (1888), p. 165.

*Clebsch*³²⁴⁾ hat die T_m von f zu den S eines mehrfach ausgedehnten Raumes in Beziehung gesetzt. Seien z. B. λ_i die Wurzeln einer $f_5(\lambda, 1)$, die einer $T_2: \xi = y_0 + \lambda y_1 + \lambda^2 y_2 / x_0 + \lambda x_1 + \lambda^2 x_2 = \varphi_2 / \psi_2$ unterworfen wird. Fasst man die $(y), (x)$ als 2 Punkte einer Ebene auf, so sind die Wurzeln ξ_i der transformierten Gleichung $f_5^{(1)}(\xi, 1) = 0$ die Schnittpunkte der Geraden $\bar{z} = \overline{(y)(x)}: z_k = y_k - \xi x_k (k = 0, 1, 2)$ mit den 5 Geraden $z_0 + \lambda_i z_1 + \lambda_i^2 z_2 = 0$, Tangenten der $C_2: z_1^2 - 4z_0 z_2 = 0$. Das letztere zeigt, warum man für das Studium der $f_5 = 0$ noch mit T_2 ausreicht. Die (linearen) S , die $f_5^{(1)}$ noch zulässt, entsprechen der Verschiebung der Punkte $(y), (x)$ auf der Geraden \bar{z} , i. e. die Formen von $f^{(1)}$ sind Kombinanten (Nr. 24) von φ, ψ . Die der T_2 spezifisch angehörigen Elemente erscheinen so gesondert von dem Einfluss einer nachträglichen S . Als Anwendung erscheint bei *Clebsch* eine Übersicht über die formalen Zusammenhänge zwischen einer f_5 und ihren Resolventen, besonders der „Jerrard’schen“ Form (I B 3 f) und der Modulargleichung (II B 4 c). *L. Maurer*³²⁵⁾ untersucht allgemein eindeutige rationale T von Urformen $F_m(x_1, x_2, \dots, x_n | a)$ einer bestimmten Ordnung m , mit Berücksichtigung der Ausartungen der F . Die F_m werden in Klassen \mathcal{Q}_i eingeteilt; \mathcal{Q}_0 umfasst alle F_m ; \mathcal{Q}_1 die durch ein bestimmtes irreducibles System algebraischer Gleichungen zwischen den a ausgeschiedenen F_m ; \mathcal{Q}_2 die durch ein weiteres solches System bedingten, u. s. f. Die Klasse \mathcal{Q}_i charakterisiert sich dadurch, dass die a (homogene) algebraische Funktionen von t arbiträren Grössen $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$ werden, sodass F die Gestalt $F(x | \lambda)$ annimmt. Die x und λ werden einer Gruppe (II A 6) von (homogenen) Transformationen $T: x_i = X_i(x' | p), \lambda_k = L_k(\lambda' | p)$ unterworfen, wo die x' rational, die λ' und die „Parameter“ p algebraisch eingehen. Die T sollen eindeutig umkehrbar sein: $x' = X'(x | p'), \lambda' = L'(\lambda | p')$, wo die p' algebraisch von den p abhängen.

Es existieren Gruppen G von T , sodass für alle Werte der p $F(x | \lambda)$ übergeht in $F^{(1)}(x' | \lambda')$; die Gesamtheit der G führt zu einer bestimmten Klasse \mathcal{Q}_i und zu deren Invarianten J . Der Beweis basiert, abgesehen von Sätzen der Lie’schen Theorie, auf einem Satze von

324) Gött. Nachr. 1871, p. 335; Math. Ann. 4 (1871), p. 284, cf. „Clebsch-Lindemann“ 2¹, Abt. 3, Nr. 11. Wegen der inversen Transf. einer $f_5(\xi)$ in eine $g_{10}(\lambda)$ s. noch *Spottiswoode*, Rom. Linc. R. (3) 7 (1883), p. 218; Lond. Math. S. Proc. 16 (1885), p. 148; *G. Pittarelli*, Rom. Linc. R. (4) 1 (1885), p. 327, 374.

325) J. f. Math. 107 (1890), p. 89 (vgl. Anm. 35, 117). — Bez. der algebraisch-geometrischen Theorie der eindeutigen Transformationen von 2 und mehr Variabeln s. I B 1 c Nr. 23, III C 9.

Christoffel (Nr. 4, Anm. 88). F und die X', L' genügen je eine Anzahl von d analogen charakteristischen linearen partiellen Differentialgleichungen; es lauten etwa die für F :

$$(F) \quad \sum_1^n \Xi_i \frac{\partial F}{\partial x_i} + \sum_1^t A_k \frac{\partial F}{\partial \lambda_k} = 0,$$

wo die Ξ nur von den x , die A nur von den λ abhängen. Die

von Ω_i sind bestimmt durch die d Gleichungen $\sum_1^t A_k \frac{\partial J}{\partial \lambda_k} = 0$; sin

d' von ihnen „wesentlich“, so hat Ω_i $t - d'$ „unabhängige“ J . Jed von $F(x | \lambda)$ verschiedene Lösung von (F) ist als „Kovariante“ von F anzusehen. Demnach bleibt der wesentliche Charakter der n^2 Differentialgleichungen *Aronhold's* (Nr. 18) für Ω_0 auch für die Ω_i erhalten.

20. Die erweiterte projektive Gruppe. Reciprokanten und Differentialinvarianten³²⁶). Bedeuten y_1, y_2, y_3, \dots die Ableitungen einer Funktion $y(x)$, so geht *Sylvester*³²⁷) aus von rationalen Funktionen $R(y_1, y_2, y_3, \dots)$, die sich nach Vertauschung von y mit x der Form nach nur um einen, in den y_i rationalen Faktor ändern. Das ist der ursprüngliche Begriff der (binären) „Reciprokante“ R . Ist R ganz

326) Die Untersuchungen dieser Nr. lassen sich auch auffassen als Spezialfälle der Lie'schen Theorie der erweiterten Gruppen oder der Differentialinvarianten kontinuierlicher endlicher (speziell projektiver) Gruppen (vgl. II A 6 „Lie-Scheffers“ 1893, Kap. 23, ausführlicher bei *A. Stöckert*, Progr. Chemnitz Realgymn. 1895); ein Teilgebiet dieser Theorie bilden wiederum die Invarianten linearer Differentialgleichungen (II A 4), auf die am Schluss dieser Nr. hingewiesen wird. Auf der andern Seite beanspruchen die hier zu besprechenden Arbeiten von formentheoretischem Gesichtspunkt aus ein selbständiges Interesse; sie erfordern spezifische, wesentlich algebraische Methoden und erscheinen ihrerseits als Verallgemeinerungen fundamentaler Sätze der Theorie der Invarianten und Semivarianten (Nr. 23). Hier ist *G. Halphen* als Hauptvorläufer von *Sylvester* zu bezeichnen: *J. de math.* (3) 2 (1876), p. 257, 371; Thèse, Paris 1878; *J. Éc. Pol. cah.* 47 (1880); *Par. Sav. [Étr.]* (2) 28¹ (1880—83); *Acta math.* 3 (1884), p. 325. *H.* macht bes. von dem Satze Gebrauch, dass eine Differentialinvariante durch Differ. nach der unabh. Var. x wieder in eine solche übergeht [Anm. 282, 329]; cf. *Sylvester*, *Amer. J.* 9 (1887), p. 297; *Elliott*, *Mess.* (2) 19 (1889), p. 7. Die Anwendungen *Halphen's* auf lineare Differentialgleichungen und Raumkurven hat *L. Berzolari* verallgemeinert: *Ann. di mat.* (3) 26 (1897), p. 1. — Im übrigen vgl. zur ganzen Nr. das Handbuch von *L. Schlesinger* über lineare Differentialgleichungen, Leipzig 1895/97.

327) 1885: *Mess.* 15, p. 74, 88; *Par. C. R.* 101, p. 1042, 1110, 1225, 1460; Bearb. von *J. Hammond*: *Amer. J. of Math.* 8 (1886), p. 196; 9, p. 1; ib. 9 (1887), p. 113, 297; 10 (1887), p. 1.

rational, $= G(y_1, y_2, y_3, \dots)$, so ist der Faktor $= \pm y_1^\mu$ (μ ganz); je nach dem Vorzeichen ist der „Charakter“ von G gerade oder ungerade, für $\mu=0$ heisst G „absolut“. Ist G homogen, $= F(y_1, y_2, y_3, \dots)$, so ist F auch isobar; legt man y_k das Gewicht $k-2$ bei, und ist i der Grad, w das Gewicht von F , so wird $\mu = 3i + w$. F ändert sich auch bei den S der „Translationsgruppe“ $x' = x + a$, $y' = y + b$ nur um einen, in y_1 linearen Faktor, und heisst „Translationsreciprokante“. — Ist F absolut, so ist $\frac{dF}{dx}$ wieder eine Reciprokante; ist

F nicht absolut, so ist es doch $y_1^{-\frac{\mu}{2}} F$. Das führt zu einem linearen Differentialoperator ξ , der aus F unendlich viele solcher Formen erzeugt. Ist F , wie $\frac{\partial F}{\partial y_1}$ eine Reciprokante, so wird F zu einer „orthogonalen“, ^{327a)} i. e. F bleibt der orthogonalen Gruppe (Nr. 3) gegenüber invariant.

$\frac{\partial F}{\partial y_1} \equiv 0$ ist das Kriterium für eine „affine“ oder „reine“ Reciprokante — im Gegensatz zu den „gemischten“ — die bei der affinen Gruppe $x' = ax + by + c$, $y' = dx + ey + f$ invariant bleibt. Zwischen den reinen Reciprokanten und den (binären) Seminvarianten (Nr. 23) bestehen Analogien. Beide genügen je einer charakteristischen linearen partiellen Differentialgleichung³²⁸⁾; für beide existieren ähnliche „Generatoren“, die Formen derselben Art erzeugen; der Cayley'schen Formel $(w : i, j) - (w - 1 : i, j)$ (Nr. 9) entspricht hier $(w : i, j) - (w - 1 : i + 1, j)$, wo $j + 2$ der höchste Index eines y_k ist; für beide hat man ähnliche „assoziierte Systeme“ (Nr. 7) oder „Protomorphe“, nur dass deren Grad bei den reinen Reciprokanten beliebig hoch steigt, während er bei den Seminvarianten nur 2 oder 3 zu sein braucht. — Während aber die rationalen Faktoren einer zerfallenden Seminvariante wieder Seminvarianten sind, trifft das bei den reinen Reciprokanten nicht zu. Bei gegebenem i , aber unbeschränktem j , giebt es nur eine endliche Anzahl reiner Reciprokanten, bei Seminvarianten nicht, u. s. w. — Ist F zugleich reine Reciprokante und Seminvariante, so wird F zur „projektiven Reciprokante“ oder „Prinzipiante“ — nach *G. Halphen*³²⁹⁾ „Differential-

327 a) Vgl. *H. Burkhardt*, Math. Ann. 43 (1893), p. 210 (§ 9).

328) Berechnungen bei *Cayley*, Quart. J. 26 (1872), p. 169; ib. 26 (1893), p. 195; Amer. J. of Math. 15, p. 75; *E. B. Elliott*, Lond. Math. S. Proc. 23 (1892), p. 298; 24 (1894), p. 21.

329) Vgl. Anm. 326. *Halphen* untersucht auch (J. Éc. Pol. 47 (1880), p. 257, 371) ternäre Differentialinvarianten bez. zweier abhängiger Variablen.

invariante“ bez. x —, ist also invariant bei der allgemeinen projektiven Gruppe in x, y . Es lässt sich eine Kette a_0, a_1, a_2, \dots von reinen Reciprokanten bilden, derart, dass nach Bildung der Protomorphe für die Seminvarianten der Reihe a_0, a_1, a_2, \dots (Nr. 2) jede ganz-rationale Funktion der Protomorphe, durch eine passende Potenz von y_2 dividiert, eine Differentialinvariante wird, und umgekehrt. — *Sylvester* begründet so eine systematische Integration von gleich Null gesetzten Differentialinvarianten, wie sie die Geometrie³³⁰ oft darbietet.

*P. A. Mac Mahon*³³¹) hat alle bei den binären Invarianten und Reciprokanten vorkommenden linear-partiellen Differentiationsprozesse in einem Symbol zusammengefasst, in das 4 arbiträre ganze Zahlen eingehen; alle diese Prozesse bilden ein „vollständiges System“.

*R. Perrin*³³²) hat seine Resduenttheorie (Nr. 8, 23) auf die Reciprokanten übertragen.

*E. B. Elliott*³³³) hat die Reciprokanten ausgedehnt auf mehrere Funktionen y, z, \dots von x , mit Beschränkung auf cyklische Vertauschung der x, y, z, \dots , und hat allgemein die ternär-projektiven Reciprokanten untersucht, *Forsyth*³³⁵) die letzteren dagegen für den Fall, dass zwei abhängige Variable linear transformiert werden. *Mac Mahon*³³⁶) stellt für die ersten 6 Grade die „perpetuierenden“ reinen Reciprokanten auf — die sich nicht als Linearformen anderer von geringerem Grad und Gewicht darstellen lassen. — *C. Leudesdorf*³³⁷) giebt ein Kriterium dafür an, dass eine vorgelegte Funktion von

330) Z. B. die Aufstellung der Differentialgleichung einer $C_3(C_n)$, *Halphen* nur auf indirektem Wege gelingt.

331) Lond. Math. S. Proc. 18 (1887), p. 61; vgl. *Cayley*, Quart. J. 26 (1887), p. 195; ib. 19 (1888), p. 112 wird von *Mac Mahon* eine Verbindung mit symmetrischen Funktionen hergestellt [I B 3 b, Nr. 10]. Ternäre Analoga des Prozesses bes. bei *Elliott*, Lond. Trans. 181 (1890), p. 19. Eine allgemeine Transformationstheorie solcher Differentialoperatoren entwickelt *Elliott*, Lond. Math. Proc. 29 (1898), p. 439.

332) Par. C. R. 102 (1886), p. 351.

333) Lond. Math. S. Proc. 17 (1886), p. 172; 18 (1887), p. 142; 19 (1888), p. 6, 377; 20 (1889), p. 131. Für die reinen tern. Recipr. werden 6 charakt. Differentialgleichungen aufgestellt (1887), und deren Bedeutung klargelegt.

334) Lond. Math. S. Proc. 20 (1889), p. 131.

335) Lond. Trans. 180 (1889), p. 71; *Hammond*, Lond. Math. S. Proc. (1886), p. 128 verwertet gewisse integrable Recipr. für die Geometrie.

336) Lond. Math. S. Proc. 17 (1886), p. 139 [Anm. 249].

337) Lond. Math. S. Proc. 17 (1886), p. 197, 329; 18 (1887), p. 235; *J. Griffiths*, Ed. Times 51 (1889), p. 137.

y_1, y_2, \dots eine Reciprokante ist. — *A. Berry*³³⁸⁾ zieht „simultane“ Reciprokanten in Betracht, mit Berücksichtigung solcher, die die Variablen selbst noch enthalten.

*L. J. Rogers*³³⁹⁾ bildet „homographische“ Reciprokanten i. e. Differentialinvarianten der quadratischen Transformation $T_2: x' = \frac{ax+b}{cx+d}$, $y' = \frac{ey+f}{gy+h}$, *A. R. Forsyth*³⁴⁰⁾ stellt ein „volles System“ für sie auf. — Ist $yu_1 = u_2$, wo u_1, u_2 2 Partikularlösungen einer $D_n(x, y) = 0$, und differenziert man $(2n-1)$ -mal nach x , und eliminiert die $u_2^{(i)}$, so resultieren n lineare homogene Relationen in den $u_1^{(k)}$. Die Resultante des Systems, eine „Quotientenableitung“³⁴¹⁾, ist eine homographische Reciprokante, denn sie ändert sich bei der bez. T_2 nur um den Faktor $\left(\frac{dy'}{dy}\right)^n \left(\frac{dx'}{dx}\right)^{-n}$. So entsteht aus $\frac{d^2u}{dx^2} = 0$ der „Schwarz'sche Ausdruck“ $3y_2^2 - 2y_1y_3$. — Allgemeiner übt *Forsyth*³⁴²⁾ auf eine $D_n(x, y | a) = 0$ die Transformationen aus, die deren Ordnung und linearen Charakter nicht ändern d. s. eine S der abhängigen y , und eine arbiträre T der unabhängigen Variablen x . *Forsyth* fragt nach den algebraischen Funktionen der y, y_1, y_2, \dots und der a , die nach der Transformation von $D_n = 0$ nur einen Faktor, eine Potenz von $\frac{dx'}{dx}$, annehmen. Aus einer endlichen Anzahl solcher Funktionen gehen alle übrigen durch rein algebraische Prozesse hervor³⁴³⁾.

21. Projektive Invarianten der Krümmungstheorie³⁴⁴⁾. *Voss*³⁴⁵⁾ geht davon aus, dass sich der Inhalt T eines Tetraeders bei Kollineation nur um einen einfachen Faktor ändert. Auf einer Fläche

338) Quart. J. 22 (1888), p. 260; 23 (1889), p. 239.

339) Lond. Math. S. Proc. 17 (1886), p. 220, 344; 18 (1887), p. 130; 20 (1889), p. 161.

340) Mess. (2) 17 (1888), p. 154.

341) Lond. Trans. 1888, p. 377. Der Name „Schwarz'scher Ausdruck“ stammt von *Cayley*, Cambr. Trans. 13 (1883), p. 6 = Pap. 11, p. 149.

342) Lond. Trans. 1889, p. 71 (dort frühere Litt.). Vgl. die systematische Darst. in *Schlesinger's* „Lineare Differentialgleichungen“.

343) Vgl. *C. Platts*, Quart. J. 25 (1891), p. 300. Wegen besonderer Fälle bei früheren Autoren s. *Forsyth* l. c.

344) Man vgl. noch *G. Darboux* „Surfaces“, Paris 1887/89 1. 2, sowie die Anwendungen, die *Elliott* von den Reciprokanten im Sinne des Textes macht, Lond. Math. S. Proc. 17 (1886), p. 172. Die Größen α, β des Textes sind die beiden Invarianten der „Laplace'schen“ Differentialgleichung, s. *Darboux* l. c. 2, § 23.

345) Math. Ann. 39 (1891), p. 179. *Voss* betrachtet auch analog beliebige Transformationen.

(III D 3) $x = x(u, v)$, $y = y(u, v)$, $z = z(u, v)$ schneiden sich je 2 benachbarte Linien $u_0, u_0 + h$; $v_0, v_0 + k$ in 4 Ecken $P = (u_0, v_0)$, $P_1, P_2, P_3 = (u_0 + h, v_0 + k)$ eines Tetraeders T , während P, P_1, P_2 ein Parallelogramm Π bestimmen. P_3 soll sich P längs einer analytischen Kurve (III D 1) $u = u_0 + k't + \dots$, $v = v_0 + k't + \dots$ nähern.

Dann tritt $\lim_{t=0} T / \Pi^2$ bei ausgezeichneten Koordinatensystemen

(u, v) zu den Krümmungsverhältnissen der Fläche in Beziehung; sind z. B. die $u = \text{const.}$ Haupttangentenkurven, so wird der Grenzwert $= \sqrt{-K}$, wo K das Krümmungsmass in P ist (III D 3, 6). — Es sei das

Linielement $\overline{PP_3} = ds = \sqrt{e du^2 + 2f du dv + g dv^2}$, ferner seien E, F, G die „Fundamentalgrössen 2. Ordnung“, und $H = eg - f^2$ (III D 6). Nimmt man (u, v) als ein „konjugiertes“ System an (für

das $F \equiv 0$), so wird $\lim_{t=0} \frac{T}{\Pi^2 ds^2} = \frac{1}{72 \sqrt{H}} \frac{E\alpha k'^2 + G\beta k^2}{e h'^2 + 2f h'k + g k^2}$, wo die

α, β nur von e, f, g abhängen. — Übt man eine Kollineation aus mit dem Nenner $t(x, y, z)$ und dem Modul Δ , so sind α, β absolute

Invarianten, während E, F, G übergehen in $E' = \frac{\lambda}{t} E$, $F' = \frac{\lambda}{t} F$,

$G' = \frac{\lambda}{t} G$, wo λ ein nur von den ersten Differentialquotienten

der Fläche algebraisch abhängender Ausdruck ist; endlich H in

$H' = \frac{\Delta^2}{\lambda^2 t^6} H$, K' in $\frac{(\lambda t)^4}{\Delta^2} K$. Hieraus fliessen zahlreiche geometrische

Anwendungen, u. a. der Satz von *R. Mehmke*³⁴⁶: „Berühren sich 2 Flächen in P , so ist der Quotient $\frac{K_1}{K_2}$ der Krümmungsmasse in P eine absolute (projektive) Invariante.“

22. Differentialformen und Differentialparameter der Flächentheorie [III D 3]. Die Flächentheorie wird beherrscht von der Transformation³⁴⁷ der beiden Differentialformen (Nr. 21)

346) Zeitschr. f. Math. Phys. 36 (1891), p. 56; vgl. *F. Wölffing*, Zeitschr. Math. Phys. 40 (1895), p. 31; *C. Segre*, Rom. Linc. R. (5) 6² (1897), p. 168. Analoge Sätze für allgemeine Punkttransformationen resp. Berührungstransformationen (II A 6) stellt *Mehmke* auf ib. 36 (1891), p. 206; 31 (1892), p. 186; 38 (1894), p. 7. *Mehmke* bedient sich zur Ableitung seiner Sätze der Grassmann'schen Methoden. — Verallgemeinerungen solcher Sätze finden sich bei *M. Rabut*, Par. C. R. 115 (1892), p. 926; J. Éc. Pol. (2) 4 (1897), p. 137.

347) Wegen weiterer Ausführungen sei verwiesen auf *J. Knoblauch*, „Flächentheorie“, Leipzig 1888; *G. Darboux*, „Surfaces“, Paris, 3 (1894), 4 (1896); *L. Bianchi*, „Superficie“, Pisa 1894 (deutsch v. *M. Lucat*, Leipzig 1896—99), sowie insbesondere auf *G. Ricci*, „Superficie“, Padova 1898. — *Knoblauch* untersucht analog kubische Differentialformen, J. f. Math. 103 (1888), p. 25; er trennt systematisch in der Theorie der Differentialparameter das Invariante von den

$$ds^2 = A = e du^2 + 2f du dv + g dv^2,$$

$$\frac{ds^2}{\varrho} = B = E du^2 + 2F du dv + G dv^2,$$

(wo ϱ der Krümmungsradius). Statt der u, v werden eindeutige und eindeutig umkehrbare, im übrigen arbiträre³⁴⁸⁾ Funktionen u', v' der u, v eingeführt. Daher transformieren sich die du, dv linear:

$$du' = \frac{\partial u'}{\partial u} du + \frac{\partial u'}{\partial v} dv, \quad dv' = \frac{\partial v'}{\partial u} du + \frac{\partial v'}{\partial v} dv;$$

der Modul sei Δ . Geht hierdurch eine quadratische Form

$$A = \alpha_{11} du^2 + 2\alpha_{12} du dv + \alpha_{22} dv^2$$

über in A' , so geschieht das Analoge für die bilineare Form

$$A_1 = \alpha_{11} du \delta u + \alpha_{12} (du \delta v + dv \delta u) + \alpha_{22} dv \delta v,$$

wo die $du, dv; \delta u, \delta v$ auch durch zu den du, dv cogrediente Grössen ersetzt werden dürfen (Nr. 16). Für $\alpha = \alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}^2$ ist $\alpha = \Delta^2 \alpha'$, oder $\sqrt{\alpha} = \Delta \sqrt{\alpha'}$; ist also $\chi(u, v)$ irgend eine Funktion der u, v , so erkennt man mit *Boole* (l. c.) sofort, dass $\frac{1}{\sqrt{\alpha}} \frac{\partial \chi}{\partial v}, -\frac{1}{\sqrt{\alpha}} \frac{\partial \chi}{\partial u}$ mit du, dv cogredient sind, also in die Identität $A_1 = A'_1$ für die $\delta u, \delta v$ substituiert werden können, wodurch sie die Gestalt $U du + V dv = U' du' + V' dv'$ annimmt, i. e. $U du + V dv$ ist eine lineare Kovariante von A . Differentiation führt zu der Invariante

$$\Delta_{\alpha}^2(\chi) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \left(\frac{\partial U}{\partial v} - \frac{\partial V}{\partial u} \right),$$

und ebenso, wenn ω eine zweite Funktion der u, v , und du, dv durch $\frac{1}{\sqrt{\alpha}} \frac{\partial \omega}{\partial v}, -\frac{1}{\sqrt{\alpha}} \frac{\partial \omega}{\partial u}$ ersetzt werden, zu der Invariante $\Delta_{\alpha}(\chi, \omega)$, die speziell für $\chi = \omega$ in $\Delta_{\alpha}^1(\chi)$ übergehe. Für $A = A$ werden $\Delta^1(\chi), \Delta^2(\chi), \Delta(\chi, \omega)$ *E. Beltrami's*³⁴⁹⁾ „Differentialparameter 1. und 2. Ordnung von χ “ und „Zwischenparameter von χ, ω “.

Koordinatenbesonderheiten, ib. 111 (1893), p. 329; er untersucht im Sinne des Textes „Biegungskovarianten“: das sind Ausdrücke, die sich aus den Ableitungen willkürlicher Funktionen von u, v und aus den e, f, g und deren Ableitungen zusammensetzen, und die bei Einführung neuer Variablen in die formell gleichgebildeten übergehen, ib. 111 (1893), p. 277; 113 (1894), p. 58; 115 (1895), p. 185; vgl. *P. Stäckel*, ib. 113 (1894), p. 58.

348) Die Gruppe ist nach *Lie* die „unendliche“ (II A 6), s. *Leipz. Ber.* 1891, p. 316, 353.

349) *Bologna Mem.* (2) 8 (1868), p. 549; man vgl. die allgemeinere Auffassung bei *Lie-Scheffers*, *Kont. Transformationsgruppen*, Kap. 22. — Die Transformation derartiger Differentialausdrücke bei Einführung neuer Veränderlicher

Ist n der „Multiplikator“ von A i. e. $nA = dp dq$, so berechnet sich K (Nr. 21) zu $\frac{1}{2} \Delta \lg n$. Die beiden absoluten Simultaninvarianten von A, B hängen direkt mit den „Hauptkrümmungen“ ϱ_1, ϱ_2 zusammen, insofern

$$H = \frac{1}{\varrho_1} + \frac{1}{\varrho_2} = \frac{eG - 2fF + Eg}{eg - f^2}, \quad \frac{1}{\varrho_1 \varrho_2} = K = \frac{EG - F^2}{eg - f^2}.$$

Die Funktionaldeterminante von A, B , dividiert durch $4\sqrt{eg - f^2}$, ist die „Krümmungslinienform“ Γ ; die Algebra liefert die Syzygie

$$\Gamma^2 = -KA^2 + HAB - B^2.$$

Das Quadrat des Linienelements $d\sigma$ auf der „Gauss'schen Kugel“ ist eine Kovariante von A, B : $d\sigma^2 = -KA + HB$.

23. Seminvarianten. Bei Cayley³⁵⁰) erscheint eine binäre Kovariante c durch ihren ersten (resp. letzten) Koeffizienten c_0 — leading term, source, Leitglied, Quelle — bestimmt, insofern aus c_0 durch Iteration eines Differentiationsprozesses die weiteren Koeffizienten von c hervorgehen. c_0 hat nur noch einer charakteristischen Differentialgleichung zu genügen (Nr. 2, 9, 15, 18). *M. Roberts*³⁵¹) hat hierauf eine ganze Theorie gegründet und im Besondern auf die f_5 angewendet; da das Leitglied eines Produktes von Kovarianten das Produkt der Leitglieder ist, so kann jede Syzygie zwischen Kovarianten (Nr. 8) durch eine solche zwischen deren Leitgliedern unzweideutig ersetzt werden. — Analoges gilt vom Leitgliede C_0 einer Komitante C von Urformen F .

Eine allgemeinere Auffassung liegt bei *S. Lie*³⁵²) vor. Danach erscheint eine „Seminvariante“ C_0 von Urformen F als relative Invariante einer Untergruppe der allgemeinen projektiven Gruppe (Nr. 2). Es liege eine Reihe von binären Urformen $f_m(x|a), g_n(x|b), \dots$ vor, so beschränkt man sich von vornherein auf Formen c_0 , die in den Reihen

behandeln nach formentheoretischen Prinzipien *Christoffel*, J. f. Math. 70 (1869), p. 46 und bes. *Gundelfinger*, ib. 85 (1878), p. 295, s. II A 2, Nr. 47.

350) I. Memoir. = Pap. 2, p. 244.

351) Quart. J. 4 (1861), p. 168, 324; die f_5 in Ann. di mat. (1) 3 (1860), p. 340.

352) *Lie-Scheffers*, Kont. Transformationsgruppen, Leipzig 1893, Kap. 23; vgl. auch *Klein*, Erlanger Programm 1872. Zu jeder proj. Untergruppe gehört eine spezifische Invariantentheorie (s. Anm. 12, Schluss; Anm. 353). Tabellen solcher Untergruppen in endlicher Form nach Tabellen von *Lie*, der die infin. Variationen der Gruppen aufstellt (s. „Lie-Engel“ 3; „Lie-Scheffers“) bei *W. Fr. Meyer*, Chic. Congr. P. 1896 (1893), p. 187; vgl. die geometrischen Ableitungen dort und bei *H. B. Newson*, Kans. U. Q. 7 (1898), p. 125. Ein Buch von *Newson* über diesen Gegenstand ist in nahe Aussicht gestellt worden.

der a, b, \dots je homogen und isobar sind (Nr. 18), sich nämlich bei Ausübung einer S der Gruppe (A) $x_1 = \alpha x'_1, x_2 = \delta x'_2$ „invariant verhalten“ i. e. nur um eine (ganzzahlige)³⁵³⁾ Potenz des Moduls $\alpha\delta$ ändern. c_0 wird zur Seminvariante, wenn es auch gegenüber der Gruppe (B) $x_1 = x'_1 + \beta x'_2, x_2 = x'_2$ invariant bleibt, und genügt dann der charakteristischen Gleichung³⁵⁴⁾

$$D \equiv \sum_i i a_{i-1} \frac{\partial}{\partial a_i} + \sum_k k b_{k-1} \frac{\partial}{\partial b_k} + \dots = 0.$$

Die Ausdehnung auf höhere Gebiete stösst auf keine prinzipiellen Schwierigkeiten (Nr. 18). c_0 ist, wie *Sylvester*³⁵⁵⁾ bemerkt, zugleich Leitglied einer Kovariante von Urformen $f_{m'}, g_{n'}, \dots$ ($m' \geq m, n' \geq n, \dots$), die mit f_m, g_n, \dots die ersten $(m+1), (n+1), \dots$ Koeffizienten gemein haben; c_0 erscheint so als Seminvariante der beliebig fortsetzbaren „Elementreihen“ $(a), (b), \dots$. Wie $D=0$ zeigt, wird, wenn man $a_0 = b_0 = \dots = 0$ setzt, der „Rest“ der Seminvariante eine solche der neuen Reihe $a_1, \frac{a_2}{2}, \frac{a_3}{3}, \dots; b_1, \frac{b_2}{2}, \frac{b_3}{3}, \dots$ etc.; das erleichtert die Aufstellung der Grundformen und ihrer Syzygien (Nr. 8, 9).

So bilden nach *R. Perrin*³⁵⁶⁾ die Leitglieder der Grundformen einer $f_n(x|a)$, vermehrt um eine gewisse „Restform“ der a , ein volles System (Nr. 6) der Restformen einer f_{n+1} . — *Sylvester*³⁵⁷⁾ begründet die Auffassung von c_0 als binärer Funktion von a_n : in diesem Sinne ist jede Kovariante von Leitgliedern wieder ein Leitglied. c_0 besitzt selbst ein Leitglied — germ, Keim —, den Koeffizienten der höchsten Potenz von a_n ; *Sylvester* und *Perrin* wenden das auf die Struktur von vollen Systemen und Syzygien an (Nr. 6, 8). *M. d'Ocagne*³⁵⁸⁾ denkt sich symbolisch a_0 als Funktion einer Variablen ξ , und a_1, a_2, \dots

353) Bei komplizierteren Gruppen, z. B. bei der Gruppe der Inversionen, kann der Faktor auch von anderer Beschaffenheit sein: vgl. *Klein* l. c.; *E. Study*, *Math. Ann.* 49 (1897), p. 497, wo das „Apollonische“ Problem formentheoretisch untersucht wird [Nr. 2, Anm. 12].

354) *Cayley* l. c. vgl. Nr. 9, Anm. 178; Nr. 18.

355) *Amer. J. of Math.* 5 (1882), p. 79; (1883), p. 97. Insbesondere werden die Perpetuanten [Nr. 12, Anm. 235, 249] untersucht. Tabellen bei *Cayley*, *Quart. J.* 19 (1883), p. 131 = Pap. 12, p. 22.

356) *Par. Soc. math. B.* 11 (1873), p. 88. *P.* sagt „péninvariant“ für „seminvariant“.

357) l. c. Weitere Ausbildung bei *J. Petersen*, *Tidsskr.* (4) 4 (1880), p. 177; 5 (1881), p. 33; (5) 6 (1888), p. 152.

358) *Par. C. R.* 102 (1886), p. 916; *Brux. S. sc.* 10 B, p. 75; 11 (1887), p. 314. Verwandt sind die Untersuchungen von *Bruno* [Nr. 15, Anm. 279] und *Mac Mahon* [Nr. 12, Anm. 246].

als die succ. Ableitungen von a_0 . Dann bilden die $\frac{d^i a_0}{d\xi^i}$ ($i=1, 2, \dots, n-1$) ein associiertes (Nr. 7) System von Seminvarianten; der Zusammenhang mit *Hermite's* System wird bei *M. d'Ocagne*³⁵⁹⁾ und *E. Cesàro*³⁶⁰⁾ klargelegt. $\frac{d}{d\xi}$, auf eine Funktion der a ausgeübt, ist nur eine symbolische Abkürzung für den Prozess $\sum a_{i+1} \frac{\partial}{\partial a_i}$; in diesem Sinne haben³⁶¹⁾ *d'Ocagne*, *Perrin*, *J. Deruyts*, *S. Roberts* eine Reihe solcher „Differentialgeneratoren“ konstruiert. *Deruyts*³⁶¹⁾ hat die Verwandtschaft des Prozesses $\sum a_{i+1} \frac{\partial}{\partial a_i} + \sum b_{k+1} \frac{\partial}{\partial b_k} + \dots$ mit *Cayley's* D - und Δ -Prozess verfolgt.

*Deruyts*³⁶²⁾ hat aber weiter allgemein die Theorie der Seminvarianten von Urformen F mit (cogredienten) Reihen von n Variabeln begründet.

Er setzt die S von x_1, x_2, \dots, x_n aus 2 Reihen einfacherer zusammen von den Typen

$$(S_h): x_h = \varepsilon X_h, x_k = X_k \quad \text{und} \quad (S_{h,i}): x_i = X_i + \eta X_h, x_k = X_k,$$

und legt Formen Φ der Koeffizienten und Variablenreihen zu Grunde, die sich gegenüber $S_h, S_{h,i}$ nur um eine Potenz des Moduls ε resp. 1 ändern. Die Forderung bez. der S_h sagt aus, dass Φ „hinsichtlich der einzelnen³⁶³⁾ Indices $1, 2, \dots, n$ isobar“ — und damit auch homogen —

359) Par. Soc. math. B. 16 (1888), p. 183; Brux. S. sc. 12 B (1888), p. 185.

360) Nouv. Ann. (3) 7 (1888), p. 464.

361) *M. d'Ocagne*, Par. C. R. 104 (1887), p. 961, 1364; *Cayley*, Quart. J. 20 (1885), p. 212 = Pap. 12, p. 326; *Mac Mahon*, ib. p. 362; Amer. J. of Math. 8 (1885), p. 1; *R. Perrin*, Par. C. R. 104 (1887), p. 1097, 1258; *Deruyts*, Brux. Bull. 13 (1887), p. 226; *S. Roberts*, Lond. Math. S. Proc. 21 (1889), p. 219.

362) 1887—1891, zusammengefasst in der Théorie gén. des formes alg., Brux. 1891. Ergänzungen, in denen D die Reduktion der invarianten Funktionen weiterführt, finden sich Brux. Bull. (3) 26 (1893), p. 258; 28 (1894), p. 157; Brux. Mém. 51 (1893), 20 S.; Brux. Mém. Sav. Ét. 52 (1894), p. 1. *Kronecker* [Nr. 18, Anm. 318] ersetzt auch die allgemeine S durch eine Reihe spezieller, deren jeder eine Differentialgleichung für die Invarianten entspricht; *Deruyts* verwendet nur einen Teil der speziellen S für die Differentialgleichungen, während der Rest durch arithmetische Gleichheiten zwischen den Gewichten ersetzt wird. — *C. le Paige* untersucht die Seminvarianten für Formen $f_1(x|y|z|\dots)$ bei unabhängigen S , Brux. Bull. (3) 2 (1881), p. 40 [Nr. 2, Anm. 30].

363) So schreibt sich eine C_i :

$$x_0^4 a_{400} + x_1^4 a_{040} + x_2^4 a_{004} + 4x_0^3 x_1 a_{310} + \dots,$$

dagegen nach der üblichen Weise:

$$x_0^4 a_{0000} + x_1^4 a_{1111} + x_2^4 a_{2222} + 4x_0^3 x_1 a_{0001} + \dots$$

wird. Sei etwa die Urform $C_n = \sum a_{ikl} x_1^i x_2^k x_3^l$, so heisst Φ , ein Aggregat von Produkten $\prod a_{ikl}^{u_{ikl}}$, „bez. der Indices 1, 2, 3 isobar“, wenn $\sum_i i a_{ikl}, \sum_k k a_{ikl}, \sum_l l a_{ikl}$ je einen konstanten Wert — das „Gewicht“ π_1, π_2, π_3 — besitzt; Φ ändert sich bei Anwendung von S_h um ε^{π_h} . Die $S_{h,l}$ lassen sich auf $n - 1$ solche: $S_{i,i+1}$ ($i = 1, 2, \dots, n - 1$) beschränken; das Kriterium für die Invarianz von Φ gegenüber $S_{i,i+1}$ ist, dass Φ einer linearen partiellen Differentialgleichung³⁶⁴) $[i, i+1] = 0$ genügt. „Seminvariante Funktion“ ist Φ bei Erfülltsein von $[i, i+1] = 0$ ($i = 1, 2, \dots, n - 1$), speziell „Seminvariante“, wenn sie von den Variablen frei ist; für $\pi_1 = \pi_2 = \dots = \pi_n$ wird Φ zur Komitante (Nr. 2). Die *Clebsch-Aronhold'sche* Symbolik (Nr. 12) wird auf seminvariante Funktionen Φ übertragen, wobei eine in den einzelnen Symbolen symmetrische — „kanonische“ — Gestalt bevorzugt wird. Φ schreibt sich so als Summe von Produkten $\delta \delta' a_x$, wo die δ, δ' Determinanten sind, die aus den n ersten Kolonnen des Schemas der (symbolischen) Koeffizienten, resp. aus den n letzten Kolonnen des Variabelnschemas entnommen werden. Der *Aronhold'sche* Prozess (Nr. 13) wird zugleich auf die Koeffizientensymbole und die Variablenreihen ausgeübt. Das „Leitglied“ einer Komitante, die n Variablenreihen zu den Ordnungen $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$ enthält, ist eine Seminvariante von den Gewichten $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$, und umgekehrt —. Die seminvariante Funktion Φ ist $\delta_n^{\pi_n} \chi$, wo δ_n die Determinante der Variablen ist; diese „primären Kovarianten“³⁶⁵) χ , der Kern der Theorie, sind allseitig isobare Formen von $n - 1$ Variablenreihen, die den $n - 2$ Gleichungen $[i, i+1] = 0$ ($i = 1, 2, \dots, n - 2$) genügen. So ergibt sich *Capelli's* Hauptsatz über Reihenentwicklungen (Nr. 17); weiter, dass die χ ein volles System besitzen (Nr. 6); ferner Verallgemeinerungen von *Sylvester's* „gegen-

Dieser Begriff des Isobarismus ist die ersichtliche Verallgemeinerung des gewöhnlichen, wenn die Gewichte einander gleich sind [Nr. 18].

364) Die $n - 1$ Gleichungen $[i, i+1] = 0$ für eine isobare Form ziehen die übrigen $[h, l] = 0$ ($h < l$) nach sich. Besondere Fälle dieser Gleichungen schon bei *J. B. Mathews*, Quart. J. 25 (1891), p. 127, der sich auf einen Hilfssatz von *Sylvester* stützt, Par. C. R. 98 (1884), p. 779, 858. Vgl. I B 3 b, Nr. 8.

Eine rationale seminvariante Funktion ist, wie bei den gewöhnlichen Invarianten [Nr. 2], als Quotient zweier ganzer seminvarianten Funktionen darstellbar: *Hilbert*, Math. Ann. 36 (1890), p. 473; vgl. *G. Gallucci*, Gi. di mat. 35 (1897), p. 206.

365) Diese finden sich in spezieller Form schon bei *Capelli*, vgl. Nr. 17, Anm. 300. Wegen der Anwendung der χ auf abzählende Fragen s. Nr. 9, Anm. 192, 193.

seitiger Differentiation“ (Nr. 16) u. a. Die χ bleiben auch anwendbar bei „partikulären“³⁶⁶⁾ i. e. invariantiv ausgearteten Urformen.

24. Kombinanten³⁶⁷⁾ und **Apolarität**. Sind $F_m^{(1)}, F_m^{(2)}, \dots, F_m^{(k)}$ Urformen in n Variabeln x_1, x_2, \dots, x_n , so wird eine Komitante nach *J. Sylvester*³⁶⁸⁾ zur „Kombinante“, wenn sie sich auch gegenüber einer S der F invariant verhält; sie hängt nur von den Determinanten gleichstelliger Koeffizienten der F ab und genügt daher noch spezifischen Differentialgleichungen³⁶⁹⁾. So ist die Resultante^{369a)} (Nr. 25) von Formen gleicher Ordnung, allgemeiner die Funktionaldeterminante von n $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, eine Kombinante.

Der Begriff der Kombinante wird von *Sylvester*³⁷⁰⁾ auf Urformen G ungleicher Ordnung ausgedehnt — sie heisst nach *H. S. White*³⁷¹⁾ dann besser „Semikombinante“ —: man multipliziere die G mit Hilfsformen niedrigster Ordnung, bis man zu Urformen F gleicher Ordnung gelangt, und greife dann die Kombinanten der F heraus, die von den Koeffizienten der Hilfsformen unabhängig sind.

Bei *Gordan*³⁷²⁾ und *E. Stroh*³⁷³⁾ erscheinen die Kombinanten der $F_m^{(i)}$ als die Komitanten der einen Urform $F = \sum u_i F_m^{(i)}$ bei unabhängigen

366) Brux. Bull. (3) 23 (1892), p. 152. Vgl. *Maurer*, Nr. 19, Ann. 325. „Study“ 2 § 10 ersetzt solche „invarianten Gleichungssysteme“ beim Äquivalenzproblem durch eine Reihe verschwindender Invarianten und identisch verschwindender Kovarianten.

367) Vgl. für diese Nr., auch wegen weiterer Nomenklatur und früherer Litteratur, *W. Fr. Meyer*, Apolarität und rationale Kurven, Tübingen 1883 (Litteraturverzeichnis am Schluss), sowie „Inv.-Ber.“ II D 6. Zur Begründung der Theorie s. noch *Clifford*, Lond. Math. S. Proc. 2 (1868), p. 116 = Pap. p. 115; *Darboux*, Bull. sci. math. 1 (1870), p. 348.

368) Cambr. Dubl. math. J. 8 (1853), p. 63, 256.

369) *Sylvester*, l. c., p. 257; vgl. *E. Betti*, Ann. di mat. (1) 1 (1858), p. 344 [Nr. 18].

369a) Die Kombinanteneigenschaft der Resultante, auch höheren Transformationen gegenüber, findet sich bei *Sylvester*, Cambr. Dubl. math. J. 6 (1851), p. 187; für spezielle Fälle schon bei *Jacobi*, J. f. Math. 22 (1841), p. 319 = Werke 3, p. 393. Vgl. die systematische Darstellung bei „Gordan“ 1, § 11, der die Resultante als besondern Fall der Funktionaldeterminante [Ann. 6, 271] behandelt. — Die Funktionaldet. der Funktionaldet. von n $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, die im besondern Polaren einer Form f sind, sind den F proportional: *Glebsch*, J. f. Math. 69 (1868), p. 355; 70 (1869), p. 175; *Rosanes*, ib. 75 (1872), p. 166; *M. Pasch*, ib. 80 (1875), p. 177.

370) Cambr. Dubl. math. J. 9 (1854), p. 86.

371) Amer. J. of Math. 17 (1895), p. 235, wo die Semikombinanten zur Typik [Nr. 7, Ann. 160] und Apolarität in engere Beziehung gesetzt werden.

372) Math. Ann. 5 (1872), p. 95, bes. p. 116; vgl. *Voss*, Münch. Ber. 1888, p. 15.

373) Math. Ann. 22 (1883), p. 393.

S der u und x , die die u nicht enthalten. Fällt die letztere Beschränkung weg, so entstehen nach *A. Brill*³⁷⁴⁾ „Kombinanten der $F_m^{(i)}$ in weiterem Sinne“. Den Kombinanten kommt nach *Hilbert* (Nr. 6) die Endlichkeit zu. Eine ausgezeichnete Kombinate R ist $|F_m^{(i)}(x^{(r)})| \begin{pmatrix} i=1,2,\dots,k \\ r=1,2,\dots,k \end{pmatrix}$, wo die $x^{(r)}$ cogrediente Variablenreihen sind; *Gordan*³⁷⁵⁾ beweist, dass jede Kombinate der $F_m^{(i)}(x)$ eine Komitante von R ist, indem er die *Clebsch-Aronhold'sche* Symbolik (Nr. 12) mit den Reihenentwicklungen (Nr. 17) kombiniert. *Stroh*³⁷⁶⁾ ersetzt im Sinne der Dualität R durch die Determinante Q , die entsteht durch Ergänzung der Koeffizientenreihen mittels entsprechender Potenzprodukte einer Anzahl zu den (x) kontragredienter Variablenreihen $(v), (w), \dots$. Q ist eine Kombinate der F , und R eine Komitante von Q . Die Anzahl der $(v), (w), \dots$ ist $N - k$, wenn N die Anzahl der Koeffizienten von F_m ist. *Stroh* stellt den k „Ordnungsformen“ $F_m^{(i)}(x|\alpha)$ $N - k$ „Klassenformen“ $\Phi_m^{(i)}(u|\alpha)$ — diese aber ohne Polynomalkoeffizienten geschrieben — gegenüber; die Komitanten der F gehen in die der Φ über, indem man an Stelle der Determinanten der α die adjungierten von denen der α setzt und umgekehrt. Hier greift durch Spezialisierung der Φ die Apolaritätstheorie³⁷⁷⁾ ein. $F_m(x)$ und $\Phi_m(u)$ heissen „apolar“³⁷⁸⁾ (Nr. 10), wenn $(F, \Phi)_m = 0$. Einem Systeme von k linear unabhängigen $F_m^{(i)}(x)$ „entspricht“ gerade ein solches von $N - k$ $\Phi_m^{(i)}(u)$, sodass stets $(F_m^{(i)}, \Phi_m^{(i)})_m = 0$ ist: beide Systeme heissen dann „zu einander apolar“; die „Allgemeinheit“ des einen Systems bedingt nach *A. Brill*³⁷⁹⁾ die des andern. *B.*³⁸⁰⁾ beweist, dass je zwei der

374) Math. Ann. 20 (1882), p. 335.

375) l. c. p. 116, für f_n in § 11.

376) l. c. Für f_n p. 403; eine zweite erzeugende Funktion stellt *S.* auf: München Progr. Ludw. Kreisrealsch. 1894.

377) *S.* Anm. 367. Für geometrische Zwecke, besonders für die projektive Untersuchung rationaler Raumkurven, hat *L. Berzolari* die Apolarität weiter ausgebaut: Ann. di mat. (2) 19 (1891), p. 269; 20 (1892), p. 101; 21 (1893), p. 1; 26 (1897), p. 1; Pal. Rend. 5 (1891), p. 9; 7 (1893), p. 5; Rom. Linc. Mem. (4) 7 (1893), p. 305. — Behufs Erzeugung und Konstruktion algebraischer Flächen hat *G. v. Escherich* den Begriff der Apolarität geeignet erweitert, Wien. Ber. 75 (1877), p. 523; 82 (1882), p. 526, 893; 90 (1884), p. 1036 [III C 5, 6].

378) Nr. 10, Anm. 197, 198. *Rosanes* sagt „konjugiert“, „Clebsch-Lindemann“ „vereinigt liegend“; *Reye* scheidet noch: „ F stützt Φ , Φ ruht auf F “.

379) Math. Ann. 20 (1882 dat. April), p. 335, wo zugleich die Erweiterung auf n Variable gegeben wird.

380) Math. Ann. 4 (1871), p. 530 [I B 1 a, Nr. 16]. Implicite steht der Satz schon bei *H. Grassmann*, Ausdehnungslehre, Leipzig 1862, Nr. 112. An-

adjungierten Determinanten der a, α proportional sind, woraus das „Kombinantenprinzip“³⁸¹⁾ fließt, dass die Kombinanten von zwei apolaren Formensystemen der Anzahl und Form nach übereinstimmen.

Die F seien jetzt binär, $= f_m^{(i)}(x_1, x_2) = f_m^{(i)}(x, 1)$. Brill³⁸²⁾ sondert aus R das Differenzenprodukt der $x^{(r)}$ ab, und setzt dann alle $x^{(r)} = x$. So entsteht eine Kombinate $W_{k(m-k+1)}(x, 1)$ die R insofern ersetzt, als jede Kombinate der f eine irrationale Form (Nr. 11) von W ist. Die Allgemeinheit der f zieht die von W nach sich; will man umgekehrt eine gegebene $f_{k(m-k+1)}$ in die Gestalt von W bringen, so bedarf es der Adjunktion einer irrationalen Funktion der Koeffizienten.

Die Quelle der Apolaritätstheorie entspringt der Ausdehnung von Sylvester's Kanonisierung der f (Nr. 10) auf Formensysteme. Bei J. Rosanes^{383a)} liegt der symbolisch bewiesene Satz zu Grunde, dass $(f_m, \varphi_m)_m = 0$ das Kriterium bildet für die Darstellung von $f(\varphi)$ als Potenzsumme der Linearfaktoren von $\varphi(f)$. Speziell sind m f_m darstellbar als Aggregate m^{ter} Potenzen derselben m Linearformen. Das Prinzip lässt sich ausdehnen^{383b)}: $F_m(y_1, y_2, \dots y_n) = 0$ sagt aus, dass $F_m(x_1, x_2, \dots x_n)$ apolar ist zu u_y^m .

wendungen des Satzes bei Clebsch, Gött. Abh. 17 (1872), p. 1; Gordan, Math. Ann. 7 (1874), p. 433; W. Fr. Meyer, „Apolarität“; W. Stahl (Ann. 397). — Wegen Verwendung des Satzes in der Zahlentheorie s. Bachmann, Quadratische Formen 1, Leipzig 1898, Abschn. 6, Kap. 3.

381) Cyp. Stéphanos, Par. Sav. [Étr.] 1880—83 [dat. Dez. 1881]. Auszug Par. C. R. 93 (Dez. 1881, p. 994). Allgemein für n Variable bei Brill, Math. Ann. 20 (1882), bes. p. 335 [Ann. 379]; W. Fr. Meyer, Apolarität § 11. Vgl. die Dissertationen: Ph. Friedrich, Giessen 1886; W. Gross, Tüb. 1887 (= Math. Ann. 31, p. 136); E. Meyer, Königsb. 1888.

382) Math. Ann. 20 (1882), p. 330. Weiter untersucht von B. Igel, Wien. Denkschr. 46 (1883), p. 350; 49 (1885), p. 277; 53 (1887), p. 155; Wien. Ber. 89 (1884), p. 218; 92 (1885), p. 1153.

383a) J. f. Math. 75 (1872), p. 172. Geometrische Anwendungen auf „Normkurven“ (Kurven n^{ter} Ordnung im Linearraum von n Dimensionen) bei W. Fr. Meyer, Apolarität; auf abwickelbare Flächen bei W. Stahl, J. f. Math. 101 (1886), p. 73; ib. (1887), p. 300; 104 (1888), p. 38; ib. (1889), p. 302. Rein geometrisch ist die binäre Apolarität untersucht von H. Wiener, Habilitationsschrift, Darmstadt 1885; vgl. W. Thieme, Zeitschr. Math. Ph. 24 (1879), p. 221, 276; Math. Ann. 23 (1884), p. 597.

383b) J. f. Math. 75 (1873) p. 312. Vgl. H. Grassmann, Gött. Nachr. 1872, p. 567; J. f. Math. 84 (1878), p. 273. Lineare Relationen zwischen gleich hohen Potenzen von Linearformen untersucht schon P. Serret geometrisch, Géom. de direction, Paris 1869. — So z. B. bestimmen 3 Punkte P_1, P_2, P_3 in der Ebene eindeutig einen vierten P_4 so, dass das C_2 -Büschel (P_1, P_2, P_3, P_4) apolar ist zu einem Klassenkegelschnitt N_2 . Bezieht man die P auf N_2 als Normkegelschnitt, so entsprechen ihnen 4 f_2 ; zwischen den f_2 und f_2^2 herrscht je eine

Hiermit wird der Polarenprozess kombiniert. Man bilde die successiven Polaren von $F = a_x^m$ i. e. $a_x^{m-1} a_y, a_x^{m-2} a_y a_z, \dots, a_x a_y a_z \dots a_w$; verschwindet die letzte, so bilden die m „Punkte“ $(x), (y), \dots (w)$ ein „Pol- m -eck“ (Nr. 10) von F , dessen Gleichung real lautet $u_x u_y u_z \dots u_w = 0$. Das Kriterium für ein Pol- m -eck von F ist die Apolarität von F und $u_x u_y \dots u_w$; ein „volles“ Pol- $(m+1)$ -eck ist ein solches, von dem je m Ecken ein Pol- m -Eck bilden u. s. f.

Algebraisch sind das Sätze wie: eine C_m ist mittels der „Seiten“ eines Pol- $(m+1)$ -ecks als Summe von $\frac{m(m+1)}{2}$ Potenzen (von Linearformen) darstellbar. — Zur Apolaritätstheorie irreduzibler Formen in höheren Gebieten hat *O. Hesse*³⁸⁴) den Grund gelegt, insofern $(C_2, K_2)_2 = 0$ das Kriterium dafür ist, dass vermöge einer (und dann auch unendlich vieler) S die eine Form nur die Quadrate, die andere nur die Produkte der Variablen aufweist. *Rosanes*³⁸⁵) und *Reye*³⁸⁶) haben

lineare Relation [Anm. 204, 212]. Artet N_2 aus in das Kreispunktepaar, so ergibt sich, dass alle gleichseitigen Hyperbeln durch P_1, P_2, P_3 noch durch einen vierten Punkt P_4 gehen [Cayley, Phil. Mag. 13 (1857), p. 423 = Pap. 3 p. 254]. Dieser Satz, verbunden mit der durch das C_2 -Büschel festgelegten ein-eindeutigen quadratischen Verwandtschaft [III C 9], beherrscht einen wesentlichen Teil der elementaren Dreiecksgeometrie [III A 2]. — Analog bestimmt im Raume ein Tetraeder $(P_1, \dots P_4)$ ein-eindeutig ein zweites $(P_5, \dots P_8)$ so, dass die $P_1, \dots P_8$ die Grundpunkte eines Netzes von F_2 bilden, das zu einer festen kubischen Raumkurve apolar ist. Algebraisch heisst das, dass vier gegebene f_3 ein-eindeutig vier weitere f_3 derart bestimmen, dass zwischen allen f_3 und f_3^2 je 4 lineare Relationen herrschen.

384) J. f. Math. 45 (1853), p. 82. Eine Ausdehnung auf C_3 giebt *O. Schlesinger*, Math. Ann. 30 (1887), p. 453. Das Kriterium von $(C_3, K_3)_3 = 0$ lautet, dass die $C_3 \propto$ Polfünfecke der K_3 enthält (vgl. *R. de Paolis*, Rom. Linc. Mem. (4) 3 (1886), p. 265). Damit ist eine Übertragung der Apolarität auf (elliptische) C_3 verbunden, s. *O. Schlesinger*, Math. Ann. 30 (1887), p. 453; 31 (1888), p. 183; 33 (1889), p. 315. Im Anschluss hieran stellt *F. London*, Math. Ann. 36 (1890), p. 535 eine resp. mehrere C_3 als Summen von Kuben linearer Formen dar; s. die Ergänzung bei *G. Scorza*, Math. Ann. 51 (1898), p. 154. Wegen entsprechender Untersuchungen über C_4 s. *G. Scorza*, Ann. di mat. (3) 2 (1899), p. 155.

385) Math. Ann. 6 (1873), p. 264. Anwendungen auf linear abhängige Punktsysteme: J. f. Math. 88 (1880), p. 241; 90 (1881), p. 303; 95 (1883), p. 247; 100 (1887), p. 311 [Nr. 3, Anm. 79].

386) J. f. Math. 72 (1870), p. 293; 77 (1874), p. 269; 78 (1874), p. 114, 345; 79 (1875), p. 159; 82 (1877), p. 1, 54, 173 (vgl. Anm. 198). Weiterhin hat *Reye* vom Gesichtspunkte der Apolarität aus eine systematische Theorie der linearen Mannigfaltigkeiten projektiver Büschel, Bündel u. s. f. aufgestellt: Berl. Ber. 1889, p. 833; J. f. Math. 104 (1889), p. 211; 106 (1890) p. 30, 315; 107 (1890), p. 162; 108 (1891), p. 89 [Anm. 440]. *E. Tisserand* liefert eine Weiterbildung und zugleich Vereinfachung von *Reye's* Theorie: Gött. Nachr. 1898, Heft 3.

daraus, mittels des Kombinantenprinzips, eine Apolaritätstheorie für Systeme von C_2 resp. im Raume von F_2 und Kurven 3. Ord. entwickelt. *W. Fr. Meyer*³⁸⁷⁾ hat die Apolaritäts- und Kombinantentheorie höherer Gebiete der der binären Kombinanten untergeordnet, insbesondere vermöge einer Reihe von Übertragungsprinzipien³⁸⁸⁾; auf Grund von kanonischen³⁸⁹⁾ Koordinatensystemen werden die Polarenprozesse umgesetzt in Umwandlungen elementar-symmetrischer Funktionen. So nimmt die Bedingung, dass zwei Punkte bez. einer C_2 konjugiert sind (III C 1), eine in deren Koordinaten linear-symmetrische Gestalt an, die je nach Spaltung der Argumente verschiedene geometrische Deutungen liefert. *O. Schlesinger*³⁹⁰⁾ und *W. Fr. Meyer*³⁹⁰⁾ sehen dabei mit Vorteil die nämliche Form, etwa eine C_2 , einmal als Ordnungs-, einmal als Klassengebilde an. Ist die Ordnung einer f_m zerlegbar $= m_1 m_2$, so greift ein anderes Hilfsprinzip ein: die Wurzeln von f_m werden gedeutet als „Punkte“ einer „Normkurve“³⁹¹⁾ [Anm. 383^a):

$$x_0 : x_1 : x_2 : \dots : x_{m_1} = 1 : \lambda : \lambda^2 : \dots : \lambda^{m_1}$$

im m_1 -fach ausgedehnten Linearraum.

Dies gestattet z. B. *Sylvester's* Kanonisierung einer f_9 und einer $F_3(x_1, x_2, x_3, x_4)$ (Nr. 10) als invariantiv äquivalent³⁹²⁾ anzusehen. Bei zwei Scharen apolarer f_m wird die Kanonisierung der einen äquivalent mit dem Auftreten gemeinsamer³⁹³⁾ Faktoren bei der andern. Für die erweiterten Kombinantens (s. oben) von k Urformen f_m ersetzt

387) „Apolarität“.

388) „Apolarität“ bes. Kap. 3. Vgl. noch *Math. Ann.* 21 (1883), p. 434, 441, 528. Eine weitere Ausbildung, auch für nicht apolare Gebilde, giebt *Study*, *Leipz. Ber.* 1890, p. 172; s. auch *E. Waelsch*, *Deutsche Math.-V.* 4 (1897) [1895], p. 113; *Wien Anz.* 1895 [Anm. 278, 391].

389) Vgl. damit die symbolische Behandlung für allgemeine Urformen bei *O. Schlesinger* (Ebene), *Diss.* Breslau, 1882 = *Math. Ann.* 22, p. 520; *F. Lindemann* (Raum), *Math. Ann.* 23 (1884), p. 111 (s. Nr. 7, Anm. 160).

390) l. c.

391) Hierbei wird ein systematischer Gebrauch vom „Prinzip des Projicierens“ gemacht, vgl. dazu *G. Veronese*, *Math. Ann.* 19 (1882), p. 161, und *W. Fr. Meyer*, „Apolarität“ [Anm. 423^a]. Die Normkurven sind seitdem vielfach behufs binärer Behandlung höherer Räume benutzt worden, insbes. von *E. Waelsch*, *Monatsh. f. Math.* 6 (1895), p. 261, 375; *Wien. Ber.* 105 (1896), p. 741 (Nr. 14, Anm. 278; oben Anm. 388).

392) „Apolarität“ § 32. Analog ist die vierdeutige Hesse'sche Kanonisierung [Nr. 11, Anm. 210; 27, Anm. 434] der C_3 : $x_1^3 + x_2^2 + x_3^3 + kx_1x_2x_3$ äquivalent mit *Sylvester's* Kanonisierung der f_6 : $l_1^6 + m_1^6 + n_1^6 + kl_1^2m_1^2n_1^2$ [Nr. 10, Anm. 194].

393) l. c. § 34.

*Brill*³⁹⁴⁾ *Gordan's* erzeugende Kombinate R durch eine andere, die aus R entsteht, wenn man successive für $1, 2, \dots k$ Reihen der f kogrediente Variabelnreihen substituiert. Geometrisch ist das die projektive³⁹⁵⁾ Theorie der „rationalen Curven“ R_n^d (III C 3, 4, 6, 7, 8) $x_0 : x_1 : x_2 : \dots : x_d = f_m^{(1)} : f_m^{(2)} : \dots : f_m^{(d)}$. Die „projektive Erzeugung“ dieser Kurven durch solche niedrigerer Ordnung hat *W. Fr. Meyer*³⁹⁶⁾ auf eine besondere Reducibilität ternärer Formen zurückgeführt; *W. Stahl*³⁹⁷⁾ giebt für eine Reihe von Fällen explizite Determinantenformeln.

25. Resultanten R und Diskriminanten³⁹⁸⁾ D . In einer Reihe besonderer Fälle hat man R ³⁹⁹⁾ und D ⁴⁰⁰⁾ durch einfachere Invarianten (Grundformen) dargestellt [I B 1 a, Nr. 19, 21].

394) Bei *W. Gross*, Diss. Tüb. 1887 (Auszug Math. Ann. 32, p. 136).

395) Math. Ann. 30 (1887), p. 30. Ein erst von *Hilbert* (Gött. Nachr. 1887, p. 30; Math. Ann. 36 (1890), p. 516 [Nr. 6]) allgemein bewiesenes Postulat setzt die Erzeugung der R_n^d als möglich voraus, d. h. es sei möglich, für ein System von $d + 1$ Formen $f_n(\lambda)$ d Systeme von $d + 1$ Formen $\varphi_{\lambda_i}(\mu)$ ($i = 1, 2, \dots d$) so zu bestimmen, dass jede Summe $\sum f(\lambda) \varphi(\mu)$ durch $\lambda - \mu$ teilbar wird und $\sum \nu = n$ ist. Ein besonderer Fall dieses „Teilungsprinzips“ [Anwendung auf Reducibilitätskriterien: I B 1 b, Nr. 5, Anm. 9] bei *Brill*, Math. Ann. 36 (1890), p. 230, Abdruck (mit Zusätzen) aus den Münch. Ber. 1885.

396) Für R_4^3 Math. Ann. 29 (1887), p. 447; für R_4^2 ib. 31 (1888), p. 96. Hierbei sind alle Ausnahmefälle berücksichtigt.

397) Math. Ann. 38 (1891), p. 561; 40 (1892), p. 1 (Anm. 380). Vgl. noch *R. Schumacher*, ib. 38 (1891), p. 298; *St. Jolles*, Habilitationsschrift, Aachen 1886.

398) Man vgl. für diese Nr. I B 1 a, Nr. 11, 16 bis 23 und I B 1 b, Nr. 11, 12, 16 bis 21, wo die R und D vom Standpunkt der Algebra überhaupt behandelt werden, während hier nur das Formentheoretische in Betracht kommt; einige Wiederholungen waren unvermeidlich. Wegen der Differentialgleichungen der R und D s. I B 1 a Nr. 18, 21 wegen der Kombinanteneigenschaften der R Nr. 24, Anm. 369*. — Über die Struktur der R und D von f_n s. *W. Fr. Meyer*, (Gött. Nachr. 1895, p. 119, 155 (bez. der R vgl. *Netto*, ib. p. 209) [I B 1 a, Nr. 18, Anm. 103]; allgemeinere Ansätze für Invarianten von f_n bei *Elliot*, Mess. (2) 26 (1896), p. 105. — Über die verschiedenen Formen der R von F bei *J. Hadamard* und *O. Biermann* s. I B 1 b Nr. 14, Anm. 61, 62. — Über die R von $2f$ als bilineare Form mit $D = 1$ bei *Gordan* s. I B 1 a Nr. 18, Anm. 104.

399) $R(f_3, f_4)$: *Brioschi*, Chelini coll. m. 1881, p. 221; $R(f_4, \varphi_4)$: *E. d'Ovidio*, Tor. A. 15 (1880), p. 385; *Brioschi*, Tor. A. 31 (1896), p. 441; $R(f_5, \varphi_5)$: *d'Ovidio*, Nap. Mem. 11 (1883); Rom. Linc. M. (4) 4 (1888), p. 607; $R(C_2^{(1)}, C_2^{(2)}, C_2^{(3)})$ (als Kombinate): *Sylvester*, Cambr. Dubl. math. J. 8 (1853), p. 256, sect. 7; *Cayley*, J. f. Math. 57 (1860), p. 139 = Pap. 4, p. 349; *S. Gundelfinger*, J. f. Math. 70 (1875), p. 73; *F. Mertens*, Wien. Ber. 93 (1886), p. 62; Inv.-Kriterien für mehrere gem. Wurzeln von $2f_n$: *Pascal*, Nap. R. (2) 2 (1888), p. 402; Ann. di mat. (2) 16 (1888), p. 85; *R. Perrin*, Par. C. R. 107 (1888), p. 22.

Darüber hinaus suchte die Formentheorie allgemein vorab nach durchsichtigen symbolischen Ausdrücken für die R und D . *Clebsch*⁴⁰¹⁾ leistet das für die $R(f_n, f_2)$ so weit, dass die reale Zurückführung auf eine Reihe intermediärer In- und Kovarianten ausführbar wird; es finden sich bei ihm auch Ansätze für eine $R(F_n, F_2, F_1^{(1)}, F_1^{(2)} \dots)$ bei m Variabeln.

*Gordan*⁴⁰²⁾ bildet die Methode aus für die $R(f_m, f_n)$. Mit Hilfe der „Bezout-Cayley’schen“ Resultantenform⁴⁰³⁾ (I B 1 a, Nr. 16) und der Reihenentwicklungen (Nr. 17) wird R für $m = n$ durch blossе Überschiebungen (Nr. 14) gewonnen; es werden Kovarianten aufgestellt, deren identisches Verschwinden das Kriterium für eine vielfache Wurzel von f_m liefert etc.

Im Falle $m \geq n$ erscheint R als Quotient von zwei symbolischen Ausdrücken; für $R(f_m, f_3)$ gelingt *E. Pascal*⁴⁰⁴⁾ noch eine direkte Lösung. Neuerdings hat *Gordan*⁴⁰⁵⁾ R ganz allgemein durch Überschiebungsprozesse ganz rational dargestellt.

Über die simultanen In- und Kovarianten von zwei f mit gemeinsamem Linearfaktor hat *Brioschi* einen einfachen Satz aufgestellt: Par. C. R. 121 (1895), p. 582; Erl. Ber. 1896, p. 116; vgl. *J. Lüroth*, Erl. Ber. 1896, p. 119; *Noether* 16, p. 110.

400) f_4 : *G. Boole* bei *Cayley*, Cambr. math. J. 4 (1845), p. 209 = Pap. 1, p. 94; [$f_{1,1,1,1}$ bei *L. Schläfli*, Wien. Denkschr. 1852, Abt. 2, p. 1]; f_6 : *Salmon*, Cambr. Dubl. math. J. 9 (1854), p. 32; f_6 : *Brioschi*, Ann. di mat. (2) 1 (1867), p. 159, ausgeführt bei *G. Maisano*, Math. Ann. 30 (1887), p. 442 [Krit. f. mehrfache Wurzeln ib. 31 (1888), p. 493; *d'Ovidio*, Tor. A. 24 (1888), p. 164, allgemeiner bei *Perrin*, Par. C. R. 106 (1888), p. 1789; ib. 107 (1888), p. 22, 219 (I B 1 b Nr. 11, Anm. 27)]; f_7 : *Gordan*, Math. Ann. 31 (1888), p. 566, vereinfacht von *Brioschi*, Ann. di mat. (2) 26 (1897), p. 255; f_8 : *Maisano*, Pal. R. 3 (1889), p. 33; 4 (1890), p. 1; C_5 : *S. Aronhold*, J. f. Math. 55 (1858), p. 97; vgl. *Sylvester*, Cambr. Dubl. math. J. 7 (1852), p. 75 (sect. 3; Analogie zwischen f_4 und C_8 [Nr. 27, Anm. 434]); p. 179 (sect. 4; mittels höherer Determinanten); C_4 : *Klein*, Math. Ann. 36 (1890), p. 1, § 19.

401) J. f. Math. 58 (1861), p. 273; vgl. *Gordan*, ib. 71 (1870), p. 164. Bei „Salmon-Fiedler“ Nr. 309, 310 eine Hyperdeterminanten-Lösung. Kriterium der Teilbarkeit einer f_n durch eine f_2 „Clebsch“ p. 91; durch eine f_m *B. Igel*, Wien. Ber. 1880 (mittels eines Eliminationsprinzips von *J. Koenig*, Math. Ann. 15 [1879], p. 168).

402) Math. Ann. 3 (1871), p. 355.

403) *Cayley*, J. f. Math. 53 (1857), p. 366 = Pap. 4, p. 38; Mess. 2 (1864), p. 88 = Pap. 5, p. 555.

404) Gi. di mat. 25 (1887), p. 257; Nap. R. (2) 2 (1888), p. 67.

405) Für $3C$: Math. Ann. 50 (1897), p. 113; Zürich Congr. Verh. 1898, p. 143; explicite für $3C_2$: J. de math. (5) 3 (1897), p. 195. Die wesentlichsten Hilfsmittel sind das von *Deruyts* erweiterte Reciprozitätsgesetz [Nr. 12, Anm. 233^a] und

Für die $D(f_n)$ hat *Gordan*⁴⁰⁶⁾ ein symbolisches Verfahren angegeben, D durch Grundformen auszudrücken: bis $n = 7$ ⁴⁰⁷⁾ incl. liess sich die Rechnung noch durchführen. D wird $= 0$ gedacht, für den bez. Doppelfaktor α_x von f kommt man durch successive Überschiebungen und Divisionen zu Gleichungen zweiten Grades in den α , deren Resultante dann D ist. Die $D(C_n)$ ^{407a)} stellt *Gordan* in invarianter Determinantenform dar.

*F. Brioschi*⁴⁰⁸⁾ hat spezifische partielle Differentialgleichungen für die binären R resp. D aufgestellt; *M. Noether*⁴⁰⁹⁾ wies nach, dass deren schon je eine einzige hinreicht. Als eine lineare Kombination von *Brioschi's* D -Gleichungen erscheint bei *E. Wiltheiss*⁴¹⁰⁾ die Differentialgleichung der hyperelliptischen θ -Funktionen [II B 4 b]. Auf Beziehungen zwischen binären R und D ging *Gordan*⁴¹¹⁾ ein, wonach die R gewisser Kovarianten von f_n den Faktor $D(f_n)$ enthalten. Führt man mit *S. Kohn*⁴¹²⁾ die Wurzeln von *Hermite's* typischer Gestalt von f (Nr. 7) ein, so ergibt sich, dass das Gewicht einer Kovariante c von f unter einer gewissen Grenze liegt, und daher $R(c, f)$, wie $D(c)$ je eine gewisse Potenz von $D(f)$ als Faktor enthalten. Entsprechendes gilt für Systeme von Urformen. Später weist *Kohn*⁴¹³⁾ nach, dass überhaupt den Invarianten von gewissen Kovarianten von f eine angebbare Potenz von $D(f)$ als Faktor zukommt.

Für einzelne partikuläre Systeme von f , wie sie die Geometrie liefert, ist der Konnex zwischen den R und D genauer untersucht.

Es sind das solche f , von denen die Singularitäten einer alge-

invariante Kriterien des Zerfallens einer C_n in Gerade; derartige Kriterien hat mit Hilfe der symmetrischen Funktionen von Variabelnpaaren aufgestellt *Brill*, Gött. Nachr. 1893, p. 757; Deutsche Math.-Ver. 5 (1897), p. 52; Math. Ann. 50 (1898), p. 157; vgl. die systematische Ausführung bei *F. Junker*, Math. Ann. 43 (1893), p. 222; 45 (1894), p. 1. *Gordan* hat die bez. Prozesse formal vereinfacht: Math. Ann. 45 (1894), p. 410 [I B 1 b, Nr. 5; I B 3 b, Nr. 26].

406) „*Gordan*“ 2, Nr. 99. — D ist der letzte Koeff. der Gl., deren Wurzeln die Differenzen der Wurzeln von f sind. Der vorletzte Koeff. ist das Leitglied einer Kov. von f , der von *Perrin* untersuchten „Subdiskriminante“ von f : J. de math. (4) 20 (1894), p. 129.

407) Math. Ann. 31 (1888), p. 568 [Anm. 400].

407a) Münch. Ber. 17 (1887).

408) J. f. Math. 53, p. 372; für $R(f_m, f_n)$ ($m \geq n$) erst bei *Gordan*, Gött. Nachr. 1870, p. 427. S. „Inv.-Ber.“ p. 94, Anm. ***).

409) „*Bruno*“ § 25.

410) Math. Ann. 33 (1888), p. 279.

411) Math. Ann. 3 (1871), p. 169.

412) Wien. Ber. 100 (1891), p. 865, 1013, vgl. *Waelisch*, ib. 100 (1891), p. 574.

413) Wien. Ber. 102 (1893), p. 801.

braischen, insbesondere rationalen Kurve n^{ter} Ordnung R_n^2 , R_n^3 der Ebene, resp. des Raumes (III C 2, 7) abhängen. Die R und D zerfallen je in eine Anzahl von Potenzen irreduzibler invarianter Faktoren, und haben letztere in verschiedener Vielfachheit gemein. Für eine kanonische Art von R_n^2 hat *A. Brill*⁴¹⁴), für allgemeine R_n^2 und R_n^3 hat *W. Fr. Meyer*⁴¹⁵) die Zerlegungen ausgeführt, deren Bedeutung für die Geometrie der Kurvensingularitäten überhaupt ersichtlich ist. — Insbesondere zerfällt die D der Funktionaldeterminante⁴¹⁶) mehrerer f_m in zwei Faktoren; *Cayley*⁴¹⁷) zeigte schon früher, dass die D der D eines Büschels $\lambda f_m + \lambda g_m$ ein Produkt AB^2C^3 ist. Allgemeiner bildet *Brill*⁴¹⁸) die R von n Formen $F(x_1, x_2, \dots, x_n, 1)$ bez. x_1, x_2, \dots, x_{n-1} , dann zeigt sich $D(R)$ durch die Resultante von den F und deren Funktionaldeterminante teilbar.

*Hilbert*⁴¹⁹) hat alle Ausartungen einer $f_n(x|a)$ aus der Potenzreihenentwicklung von $D(f)$ erschlossen. Verschwindet D , als Form der a_i , nebst allen $(n-k-1)$ ersten Polaren identisch, so zerfällt die $(n-k)^{\text{te}}$ in $n-k$ Linearfaktoren. Koinzidieren von diesen je $\mu_i - 1$ ($i=1, 2, \dots, k$), so auch die Linearfaktoren von f zu je μ_i , und umgekehrt. Überdies lassen sich alle Singularitäten⁴²⁰) des Gebildes $D=0$ diskutieren.

*F. Mertens*⁴²¹) hat den Begriff der R vom Eliminationsprozess abgelöst; wenn die Urgleichungen $F'(x|a)=0$ keine Lösung gemein haben, so existiert R als lineare Kombination der F' (mit Hilfsformen der x, a als Koeffizienten) von vorgegebenem Grade in den a , die von

414) Math. Ann. 16 (1880), p. 345 [vgl. noch ib. 12 (1877), p. 90].

415) $n=2$: Gött. Nachr. 1888, p. 74; Math. Ann. 38 (1891), p. 369; $n=3$: Gött. Nachr. 1890, p. 366, 493; 1891, p. 14; eingehender in Monatsh. f. Math. 4 (1893), p. 229, 331; Auszug in Math. Ann. 43 (1893), p. 286.

416) Math. Ann. 20 (1882), p. 336.

417) Phil. mag. 11 (1856), p. 425 = Pap. 3, p. 214, vgl. *R. Russel*, Quart. J. 21 (1886), p. 373; *Hilbert*, Math. Ann. 31 (1888), p. 482. Weitere Fälle, mit Anwendungen auf algebraische Kurven bei *J. Madison*, Quart. J. 24 (1893), p. 307; auf singuläre Lösungen von Differentialgleichungen ib. 28 (1896), p. 311.

418) Gött. Nachr. 1892, p. 89.

419) Math. Ann. 30 (1887), p. 437 [Verallg. einer Identität zwischen Potenzen von f_n : *W. Fr. Meyer*, „Apolarität“ p. 350; Math. Ann. 21 (1882), p. 441]. Für Evektanten schon bei *Sylvester*, Phil. mag. (4) 3 (1852), p. 375, 460; *Cayley*, Lond. Trans. 147 (1857), p. 727 = Pap. 2, p. 465 [I B 1 a, Nr. 22].

420) I B 1 c, Nr. 15.

421) Wien. Ber. 93 (1886), p. 527. Für f_n bei *Kronecker*, Berl. Ber. 1881, p. 535 = Werke 2, p. 113. Der Gedanke geht auf *Bezout* zurück [I B 1 b, Nr. 6].

den x frei ist. *R. Perrin*⁴²²) und *Brill*⁴²³) haben die „reduzierte“ Resultante R' der F untersucht, deren Verschwinden besagt, dass die $F=0$ ausser gewissen von vornherein gemeinsamen Lösungen noch eine weitere besitzen: R' erscheint bei *Brill* als gemeinsamer Faktor gewisser Entwicklungsglieder, für die ein Berechnungsalgorithmus gegeben wird^{423a}).

26. Realitätsfragen⁴²⁴). Die Sturm'schen Funktionen (I B 3 a, Nr. 5), die durch ihre Zeichenwechsel und -Folgen die Anzahl der reellen Wurzeln einer f_n zwischen gegebenen Grenzen ablesen lassen, werden von *H. Schramm*⁴²⁵) ersetzt einmal durch eine Reihe von Kovarianten, sodann durch eine Reihe von Invarianten. Insbesondere sind, wenn alle Wurzeln von $f(x|a)$ reell sind, die von $H=(f, f)_2$ komplex und umgekehrt; *Sylvester*⁴²⁶) dehnt den Satz auf die Kovarianten 2. Grades in den a aus. — *Edm. Laguerre*⁴²⁷) hat die Prozesse behufs Separation und Approximation [I B 3 a, Nr. 4, Anm. 9] der reellen Wurzeln von f unter Benutzung von Kovarianten (H u. a.) verallgemeinert. — *W. Fr. Meyer*⁴²⁸) hat ein „Trägheitsgesetz“ für

422) Par. C. R. 106 (1888), p. 1789; 107, p. 22, 219. Ein Beispiel bei *Cayley*, Quart. J. 11 (1871), p. 211 = Pap. 8, p. 46.

423) Math. Ann. 4 (1871), p. 510, 527; Münch. Ber. 17 (1889), p. 91.

423a) Die Theorie der Kombinanten [Nr. 24] hat *Cyp. Stéphanos* für die Bildung von R verwertet: Par. Thèse 1883; vgl. *W. Fr. Meyer*, Math. Ann. 38 (1891), p. 369 (§ 8); Bremer Naturf.-Vers. Verh. 1891, p. 9. Geometrisch sind das gewisse Projektionsmethoden [Anm. 391].

424) Wegen invarianter Realitätskriterien für die Wurzeln von $f_n=0$, insbes. der $f_3=0$, durch *Hermite*, *Sylvester* und *Jacobi* s. Anm. 38, 147. Vgl. noch *Sylvester*, Lond. Trans. (1864), p. 579; *Cayley*, VIII. Mem.; *E. Laguerre*, Anm. 427 [I B 1 a, Nr. 23; I B 3 a, Nr. 8]. Vorher hatte schon *Cayley* im V. Mem. die $f_3=0$ und $f_4=0$ erledigt, s. die Ergänzung von *Noether* bei „Bruno“ § 20, der die beiden Fälle von 4 komplexen und 4 reellen Wurzeln invariantiv trennt. *K. Rohn* hat Fadenmodelle konstruiert, die alle Realitätskriterien der $f_4=0$ veranschaulichen, s. Leipz. Ber. 43 (1891), p. 1 (Anm. 433). — Über die Untersuchung der „ D -Mannigfaltigkeit“ $D=0$ durch *Kronecker*, *Brill*, *Gordan* u. a. s. I B 1 a, Nr. 22, I B 1 c; Nr. 15, Anm. 67; s. noch Nr. 10, Anm. 204 ($f_6=0$), Nr. 25, Anm. 419 (Ausartungen der D -Mannigfaltigkeit). — Mit der reellen Transformation reeller F_2 resp. $F_{1,1}$ haben sich besonders *Weierstrass* (Anm. 52, 53), *Sylvester* (Anm. 56), *Lipschitz* (Anm. 70), *Stickelberger* (Anm. 73), *Voss* (Anm. 74), *Hensel* (Anm. 38, Ende), *Taber* (Anm. 71) beschäftigt.

425) Ann. di mat. (2) 1 (1867), p. 259; 3 (1869), p. 41. Bez. der H s. noch *F. Gerbaldi*, Pal. Rend. 3 (1889), p. 22; *P. H. Schoute*, ib. p. 160.

426) J. f. Math. 87 (1879), p. 217.

427) Par. C. R. 1879/82, zusammengefasst in J. de math. (3) 9 (1883), p. 99 = Oeuvres p. 3.

428) Gött. Nachr. 1891, p. 272 [Nr. 10, Anm. 196].

$f_{2n+1}(x|a)$ aufgestellt. Es existiert eine geschlossene Reihe von Kurvenvarianten $f = f^{(0)}, f^{(1)}, f^{(2)}, \dots, f^{(n)}$, deren D (Nr. 25), excl. die erste und letzte, in 2 Faktoren zerfallen, so, dass je 2 successive eine Faktör gemein haben. Die Reihe der $f^{(i)}$ hat, von singulären Übergängen abgesehen, eine von den a unabhängige Anzahl reeller Wurzeln. — Realitätsfragen drängen sich auf, wenn man den Bereich der Variablen einer Form in das komplexe Gebiet verlegt. So hat *Klein*⁴²⁹⁾ die Gruppe der einen regulären Körper (Nr. 5) mit sich zur Deckung bringenden S von $z = x + iy$ auf der Kugel verfolgt: ist z ein beliebiges, der Gruppe unterworfenen Kugelpunkt, so erhält man z. B. im Ikosaederfalle 4 reelle Werte. *Wedekind*⁴³⁰⁾ konstatiert u. a., dass das Doppelverhältnis von vier z nur dann reell sein kann, wenn sie in einer Ebene liegen.

In der Theorie der Kurvensingularitäten spielt die Realität eine wesentliche Rolle. *Brill*⁴³¹⁾ lässt die in ihre Faktoren zerspaltenen I der bezüglichen Gleichungen (Nr. 25) durch Null hindurchgehen und beobachtet die Realitätsveränderungen der Wurzeln; so beweist er algebraisch eine von *Klein*⁴³²⁾ anschaulich erhaltene Realitätsrelation zwischen Singularitätenanzahlen (III C 2, 3). *W. Fr. Meyer*⁴³³⁾ hat derartige Realitätsänderungen für Raumkurven systematisch untersucht.

27. Weitere spezielle Formen⁴³⁴⁾ und Gruppen⁴³⁵⁾. 1. Die „Zur

429) Erl. Progr. 1872; Math. Ann. 9 (1875), p. 183, s. Anm. 93. Über verwandte Untersuchungen von *J. Steiner* s. III A 3. — *C. Segre* und *C. Juel* haben die projektiven Eigenschaften der einfachsten ebenen und räumlichen Gebilde untersucht, wenn die Punktkoordinaten, wie die S -Koeffizienten komplex sind. *Segre*, Tor. A. 1890: 25, p. 276, 430; 26, p. 35, 592; Math. Ann. 40 (1892), p. 413. *Juel*, Acta math. 14 (1890), p. 1.

430) Math. Ann. 9 (1875), p. 209. Vgl. *G. Holzmüller*, Isogonale Verwandtschaften, Leipz. 1882, § 21 (wo auch frühere Litter.).

431) Math. Ann. 16 (1880), p. 345, bes. § 7; s. Anm. 414.

432) Math. Ann. 10 (1876), p. 199. *H. G. Zeuthen* hatte vorher die Realitätsverhältnisse der 28 Doppeltangenten und 24 Wendetangenten einer C_4 untersucht, Math. Ann. 7 (1874), p. 410. Die Maximalzahl der reellen Wendungen ist 8 (die auch existieren). Nach *A. Harnack*, Math. Ann. 10 (1876), p. 189 hat eine $C_n = 0$ höchstens $p + 1$ reelle Züge, die auch erreicht werden können. Vgl. *L. S. Hulburt*, N. Y. Bull. 1 (1892), p. 197; Amer. J. of Math. 14 (1892), p. 240. Die entsprechende Anzahl für Raumkurven (nebst Erweiterungen für ebene Kurven) hat *Hilbert* festgestellt, Math. Ann. 38 (1891), p. 115, das Maximum kann gleichfalls erreicht werden. — *Klein* untersucht Realitätsverhältnisse auf „Riemann'schen Flächen“, Autogr. Vorl., Gött. 1891/92; Math. Ann. 42 (1893), p. 1, w. weitere Litteratur angegeben.

433) Gött. Nachr. 1891, p. 1, s. Anm. 415.

434) S. „Inv.-Ber.“ p. 275, 276. Wegen der algebraisch-geometrischen Theorie der C_2 , F_2 und damit verknüpfter Gebilde s. „Clebsch-Lindemann“ und

sammensetzung“ einer „ r -gliedrigen Gruppe“ (II A 6) wird bei *Lie*⁴³⁶) definiert durch Relationen $(X_i X_k) = \sum_{s=1}^{s=r} c_{iks} X_s$, wo die c quadratischen

III C 1, 4. — Bez. der geom. Deutung von invarianten Gebilden auf rationalen Kurven durch *Lindemann*, *Sturm*, *d'Ovidio*, *W. Fr. Meyer*, *Berzolari* u. a. s. die in den Anm. 367, 377 citierte Litteratur. — Bez. der C_3 [„Clebsch-Lindemann“ 1 und III C 1, 3, 4] und $F_3(x_1, \dots, x_4) = F_3$ [III C 6] beschränken wir uns auf Folgendes. Das volle System der C_3 von 34 Komitanten zuerst bei *Gordan*, *Math. Ann.* 1 (1869), p. 90, vgl. *Clebsch* und *Gordan*, ib. 6 (1873), p. 436 [dort frühere Litt.]; einfacher bei *Gundelfinger*, *Math. Ann.* 4 (1871), p. 144. Eine explizite Tabelle des Systems für die C_3 in der Hesse'schen Normalform [Nr. 11, Anm. 210] $ax^3 + by^3 + cz^3 + 6dxyz$ liefert *Cayley*, *Amer. J.* 4 (1881), p. 1 = Pap. 11, p. 342; für gewisse andere kanonische Formen *F. Dingeldey*, *Math. Ann.* 31 (1888), p. 157. — Über associierte Systeme der C_3 s. Nr. 7, Anm. 155. — Über Apolaritätseigenschaften der C_3 s. Nr. 24, Anm. 384. — *H. Poincaré* erledigt die algebraische (und daraufhin die arithmetische) Äquivalenz der C_3 , wie F_4 , *J. éc. pol.* 50, p. 199; 51, p. 45 (1883), insbes. für reelle Koeffizienten und S ; die zerfallenden C_3 werden analog untersucht, ib. 56 (1886), p. 79. Die algebraischen Ausartungen der C_3 hatte schon *Gundelfinger* invariantiv fixiert, *Math. Ann.* 4 (1871), p. 561; *Ann. di mat.* (2) 5 (1872), p. 223, vgl. *Gordan*, *Math. Ann.* 3 (1871), p. 631. Wegen der Kriterien für das Zerfallen einer C_3 (allgemein C_n) in Linearfaktoren s. Anm. 405; I B 1 b, Nr. 5; I B 3 b, Nr. 26. — Parallelismus zwischen C_3 und f_4 : *Sylvester*, *Cambr. Dubl. math. J.* 8 (1853), p. 256 (sect. 7); *Hesse* [Anm. 14, 210]; *Aronhold*, *J. f. Math.* 39 (1849), p. 140 [Anm. 211]; *Brioschi*, *Ann. di mat.* (2) 7 (1875), p. 52; *Hilbert*, *J. de math.* (4) 4 (1888), p. 249 [Anwendung auf die Transf. 3. Ordg. der zur f_4 resp. C_3 gehörigen ellipt. Funktionen bei *Brioschi* l. c., vgl. die geom. Behandlung bei *Cayley*, *Quart. J.* 13 (1875), p. 211 = Pap. 9, p. 522; Zurückführung auf die Theorie der kubischen Involution $\lambda f_3 + \lambda g_3$ bei *O. Bolza*, *Math. Ann.* 50 (1898), p. 68]. — Eine C_3 mit $D = 0$ wird von *F. Dingeldey* auf eine kanon. Form gebracht, *Math. Ann.* 30 (1888), p. 177. — Das „syzygetische“ Büschel $\lambda C_3 + \lambda H_3$ bei *Battaglini*, *Chelini Coll. Math.* 1881, p. 27. — *A. Harnack* untersucht Diff.gleichungen, die nach *Clebsch* mit gewissen Zwischenformen der C_3 verknüpft sind, *Math. Ann.* 9 (1875), p. 218.

Über das Pentaeder der F_3 und damit verknüpfte Apolaritätseigenschaften s. Nr. 10, Anm. 199; Nr. 14, Anm. 278; Nr. 24, Anm. 392 [III C 6]. Das Pentaeder als Komitantenform, nebst Beweis des Pentaedersatzes, bei *Gordan*, *Math. Ann.* 5 (1872), p. 376. — Die wichtigsten Komitanten der F_3 bei *Salmon*, *Lond. Trans.* 150 (1860), p. 229, und *Clebsch*, *J. f. Math.* 58 (1861), p. 93, 109; weiteres Formenmaterial bei *R. de Paolis*, *Rom. Linc. M.* (2) 10 (1880/81), p. 123. — Associierte Systeme der F_3 : s. Nr. 7, Anm. 154. — Die wichtigsten Invarianten der F_3 studiert geometrisch *K. Bobek*, *Monatsh. f. Math.* 8 (1897), p. 145. — Die Erzeugung der F_3 durch 3 trilinear reciprok verknüpfte Strahlenbündel führt *M. Pannelli* formentheoretisch aus, *Ann. di mat.* (2) 22 (1894), p. 237. — Das algebraische Kriterium dafür, dass ein F_3 -Gebüsch Polarengbüsch einer F_3 wird, bei *E. Toeplitz*, *Math. Ann.* 11 (1877), p. 432; *W. Frahm*, ib. 7 (1874), p. 635. [Geometrisch bei *H. Thieme*, *Math. Ann.* 28 (1886), p. 133.]

435) Über die orthogonale Gruppe, allgemeiner die eine F_2 , resp. $F_{1,1}$ invariant lassende Gruppe von S vgl. Nr. 3 und Nr. 6, Anm. 145, Schluss. —

Bedingungen genügen, und die $X_s = X_s f$, die infinitesimalen Transformationen der Gruppe, linear geändert werden können, ohne die Zusammensetzung zu ändern. In diesem Sinne ist⁴³⁷⁾ die trilineare Form $F(x, y; X) = (\sum x_i X_i, \sum y_k X_k) = \sum c_{iks} x_i y_k X_s$, gegenüber kogredienten S der x, y , kontragredienten der X , eine Invariante der Zusammensetzung. Die Bedingungen für die c sagen aus, dass 2 gewisse Kovarianten von F identisch verschwinden, und das bedeutet einmal, dass F bez. der $(x), (y)$ alternierend ist, dann, dass auch jede infinitesimale Transformation der „adjungierten“ Gruppe F invariant lässt.

2. *Gordan* und *Noether*⁴³⁸⁾ haben ein Kriterium dafür angegeben, wann eine $F(x_1, \dots, x_n)$ vermöge S in eine F' von weniger Variabeln übergeführt werden kann, und, wenn das der Fall, die S ermittelt. Damit wird ein Satz von *Hesse*⁴³⁹⁾ eingeschränkt, wonach das Kriterium durch $H(F) \equiv 0$ [Nr. 14, Anm. 272] ausgedrückt sei: *Hesse's* Satz gilt allgemein nur für $n = 2, 3, 4$ und für die $F_2(x_1, \dots, x_n)$, während für $n > 4$ ganze Klassen von Formen angegeben werden können, für die $H \equiv 0$ ist, ohne dass zwischen ihren Polaren lineare

Zu Nr. 3 und Nr. 5 seien noch folgende Ergänzungen gegeben. Anm. 42: Die Cayley'sche Darstellung durch Parameter hat *G. Rost*, Dissert. Würzburg 1892, auf S von beliebiger Periode ausgedehnt [I B 3 f, Nr. 1]; Anm. 54: *F. Klein*, Vorl. über Gleichungen, Gött. 1891/92, bringt Df_n auf die typische Gestalt $|a_{ik} + \lambda b_{ik}|$; Anm. 79: Bez. der Leistungen von *Battaglini* s. *E. d'Ovidio*, Rom. Linc. M. (4) 1 (1895), p. 558; Anm. 116*: *Math. Ann.* 52 (1899), p. 363. — Ferner sei noch erwähnt, dass *H. S. White*, N. Y. Bull. (2) 4 (1897), p. 17 das Kriterium für eine S -Gruppe aufstellt, die eine $C_2 = 0$ resp. $C_3 = 0$ (und damit zugleich eine ganze Schar von $C_2 = 0$ resp. $C_3 = 0$) in sich überführt. — Über andere projektive Untergruppen s. Nr. 23, Anm. 352. — Über ausgeartete Kollineationen und Korrelationen der Geometrie (*Hirst, Visalli*) s. III C 9. — Über die Inversionsgruppe (Gruppe der reziproken Radien in der Ebene) und ihre Anwendung auf das Apollonius'sche Problem bei *Study* s. Nr. 2, Anm. 12, Nr. 23, Anm. 353. — Die

$f(x|y)^m^n$ (Anm. 30) bei unabhängigen S untersucht geometrisch mittels Normkurven *Waelsh*, Deutsche Math.-V. 5¹ (1897), p. 58, eingehend den Fall $m = 3, n = 3$ (System von zwei kubischen Raumkurven) *Math. Ann.* 52 (1899), p. 293.

436) *Lie-Engel*, Kont. Transfgruppen 1, Leipzig 1888.

437) *F. Engel*, Leipz. Ber. 1886, p. 83. Bez. der Invariantentheorie der trilinearen Formen s. *Le Paige*, Par. C. R. 92 (1881), p. 1099 und Anm. 30, 195.

438) *Gordan*, Erl. Ber. 1876, p. 89 ($n = 3$); *Noether*, ib. p. 51 ($n = 4$); *Gordan* und *Noether*, *Math. Ann.* 10 (1876), p. 547 bes. p. 561 [I B 1 b, Nr. 22]. Für die C_2 und $F_3(x_1, \dots, x_4)$ hatte *Pasch* den Satz mittels Determ.-Relationen bewiesen, *J. f. Math.* 80 (1875), p. 169. — Es sei noch erwähnt, dass nach *Voss* für F_3 $H(H)$ eine lineare Kombination von F und H ist, *Math. Ann.* 27 (1886), p. 515 [für $n = 4$ schon bei *G. Bauer*, Münch. Abh. 1883, p. 1 (III C 6)].

439) *J. f. Math.* 42 (1851), p. 117 [vgl. *Sylvester*, *Phil. Mag.* (4) 5 (1853), p. 119]; 56 (1859), p. 263 [I B 1 b, Nr. 22].

Relationen existieren. Die Untersuchung von *Gordan* und *Noether* beruht auf einer linearen partiellen Differentialgleichung, der F und ihre Polaren genügen [Nr. 13, Anm. 260], und deren Koeffizienten selbst wieder von einem System partieller Differentialgleichungen abhängen. Aus der Zahl der Systemlösungen sind die auszuscheiden, die ganze Funktionen der Variablen sind. Zu dem Behuf werden die Variablen „uneigentlich“ rational transformiert, d. h. so, dass die Determinante der Transformation nebst einer Reihe ihrer Minoren verschwindet⁴⁴⁰).

440) Uneigentliche S spielen bei *Hilbert*, Math. Ann. 42 (1893), p. 313 [Nr. 6, Schluss] eine fundamentale Rolle in der Theorie der vollen Systeme; desgl. bei *Study*, Nr. 18, Anm. 316, in der formentheoretischen Untersuchung der Differentialgleichungen der Invarianten; bei *Waelsch* [Nr. 14, Anm. 278], der durch Nullsetzen eines Aggregates von binären Überschiebungen Mannigfaltigkeiten verschiedener Dim. in Beziehung setzt; endlich in der algebraischen und geometrischen Theorie der linearen Scharen von S [Nr. 3 und Nr. 24, Anm. 336]. — Die Ausübung einer uneig. S (x_1, x_2, \dots, x_n) vom „Range“ r [I B 2, Nr. 24] ist geom. äquivalent der Projektion eines Linearraumes R_n in einen R_{n-r} von einem R_r aus, verbunden mit einer Kollineation des R_{n-r} . Während im allg. Falle $r=0$ [Nr. 2] die transformierte Inv. durch die ursprüngliche teilbar wird, werden jetzt lineare Systeme von transformierten Inv. Modulsysteme [I B 1 b, Nr. 26; I B 1 c, Nr. 13] der ursprünglichen, wobei die Koeffizienten von den r -ten Minoren des S -Moduls ganz-rational abhängen. Im übrigen findet eine analoge Weiterentwicklung statt, wie in Nr. 2.

Nachträge.

Zu Anm. 38, Z. 2, p. 328: *Borchardt* = Werke p. 469.

Zu Anm. 48, Z. 3, p. 329: *Borchardt* = Werke p. 3.

Zu Anm. 239, p. 364: *Clifford* = Pap. p. 255.

Zu Anm. 240, p. 364: *Clifford* = Pap. p. 258, 277.

Zu Anm. 287, p. 371: *Rankine*, Thomson l. c., p. 261, 481.

Zu Anm. 328, p. 381: *Cayley* [statt 1872 lies 1892] = Pap. 13, p. 333, 366, 405.

IB 3. GLEICHUNGEN.

IB 3 a. SEPARATION UND APPROXIMATION DER WURZELN

VON

C. RUNGE

IN HANNOVER.

Inhaltsübersicht.

1. Einleitung.

Die Separation der Wurzeln.

2. Grenzen für die Wurzeln.

3. Die Differenzengleichung.

4. *Descartes'* Zeichenregel und *Budan-Fourier's* Satz.

5. Der *Sturm'sche* Satz.

6. *Cauchy's* Integral.

7. Charakteristiken-Theorie.

8. Die quadratischen Formen im Zusammenhange mit dem *Sturm'schen* Satz.

9. Numerisches Beispiel für die Separation.

Die Approximation der Wurzeln.

10. Das *Newton'sche* Verfahren.

11. Allgemeinere Verfahren.

12. *Horner's* Schema.

13. *Bernoulli's* Verfahren.

14. *Graeffe's* Verfahren.

15. Die Approximation für den Fall mehrerer Veränderlichen.

Litteratur.

- Vergleiche die betreffenden Kapitel in den Lehrbüchern der Algebra, wie:
J. A. Serret, Cours d'algèbre supérieure. 4. Aufl. Paris 1877. Deutsch von
G. Wertheim, Leipzig 1868. 2. Aufl. 1878.
J. Petersen, De algebraiske Ligningers teori. Kjöbenhavn 1877, deutsch 1878,
franz. 1896.
E. Netto, Vorlesungen über Algebra, Leipzig, I, 1896; II, 1, 1898.
H. Weber, Lehrbuch der Algebra. Braunschweig, 1, 1895. 2. Aufl. 1898. 2, 1896;
franz. von *J. Griess*, Paris 1898.

A. Capelli, Algebra complementare. Napoli, Pellerano 1895. 2. Aufl. 1898.

Die zahlreichen Monographien über numerische Auflösung behandeln
immer nur besondere Methoden.

Einleitung.

1. In vielen praktischen Fällen, wo die Werte einer Veränderlichen gesucht werden, die einer gegebenen transcendenten oder algebraischen Gleichung genügen oder die Werte mehrerer Veränderlichen, die mehreren solchen Gleichungen genügen, sind uns durch die Natur der Sache Näherungswerte der gesuchten Grössen schon bekannt, und es handelt sich nur darum, genauere Annäherungen zu finden. Newton hat dafür eine Methode angegeben¹⁾, die ursprünglich für den Fall einer Veränderlichen erfunden, sich auch auf den Fall beliebig vieler Veränderlichen übertragen lässt. Der Gedanke besteht darin, dass, wenn a der erste Näherungswert einer Wurzel der Gleichung $f(x)=0$ ist und p die Verbesserung bedeutet, die Funktion $f(a+p)$ nach Potenzen von p entwickelt wird. Vernachlässigt man dann die Glieder zweiter Ordnung, so ergibt sich für p die Gleichung ersten Grades: $f(a) + f'(a)p = 0$, aus der p gefunden wird. Mit der auf diese Weise ermittelten zweiten Annäherung wiederholt man dieselbe Rechnung u. s. w. Dasselbe Verfahren lässt sich auf zwei oder mehr Veränderliche übertragen, die zwei oder mehr Gleichungen genügen sollen. Sind z. B. die beiden Gleichungen $f(xy) = 0$ und $g(xy) = 0$ zu erfüllen und ist $x = a$, $y = b$ ein Wertsystem, das den Gleichungen angenähert genügt, so setze man $x = a + h$, $y = b + k$ und entwickle die beiden Funktionen $f(xy)$ und $g(xy)$ nach Potenzen von h und k . Mit Vernachlässigung der Glieder zweiter Ordnung erhält man so zwei Gleichungen ersten Grades für h und k , die nach h und k aufgelöst ein verbessertes Wertsystem liefern, mit dem man dieselbe Rechnung wiederholen kann u. s. w.

Auf diese Weise berechnen z. B. die Seeleute aus den Höhenbeobachtungen zweier Gestirne die Verbesserungen ihrer Länge und Breite, deren Näherungswerte ihnen aus der Loggerechnung bekannt sind und zwar meistens genau genug, um nur ein System von Verbesserungen zu erfordern. Die Auflösung der beiden linearen Gleichungen kann dabei auch graphisch geschehen durch Zeichnung der beiden Graden (Sumner-Linien), deren Gleichungen sie darstellen.

Für viele praktische Zwecke werden diese Bemerkungen genügen, wenn wir noch hinzufügen, wie die Genauigkeit der Näherungen beurteilt werden kann. Es habe die als stetig vorausgesetzte Funktion $f(x)$ für $x = a$ das entgegengesetzte Zeichen wie für $x = b$, während

1) J. Newton, *Analysis per aequationes numero terminorum infinitas*, London 1711. Ferner Brief an Oldenburg v. 13. Juni 1676 und *Methodus fluxionum*, Lond. 1736, introductio.

die Ableitung $f'(x)$ für alle Werte $x = a$ bis $x = b$ zwischen zwei endlichen Grössen m und M gleichen Zeichens liegt. Dann liegt eine und nur eine Wurzel zwischen a und b . Sind nun x_1 und x zwei beliebige Werte, die dem Intervall a bis b angehören, so ist

$$f(x_1) - f(x) = \int_x^{x_1} f'(x) dx. \text{ Mithin liegt } f(x_1) - f(x) \text{ zwischen den}$$

Grenzen $m(x_1 - x)$ und $M(x_1 - x)$. Wenn also für x der Wert der zwischen a und b liegenden Wurzel eingesetzt wird, so ergibt sich, dass $f(x_1)$ zwischen $m(x_1 - x)$ und $M(x_1 - x)$ liegt, und mithin, dass

$x_1 - x$ zwischen $\frac{f(x_1)}{m}$ und $\frac{f(x_1)}{M}$ liegt. Ist m die dem absoluten Be-

trage nach kleinere der beiden Grössen m, M , so ist also der Fehler der Näherung x_1 absolut genommen nicht grösser als $\frac{f(x_1)}{m}$. Berechnet

man mit x_1 die folgende Näherung $x_2 = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)}$, so liegt

$x_1 - x_2 = \frac{f(x_1)}{f'(x_1)}$ ebenfalls zwischen den Grenzen $\frac{f(x_1)}{m}$ und $\frac{f(x_1)}{M}$; folg-

lich ist der Fehler von x_2 absolut genommen nicht grösser als $f(x_1) \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{M} \right)$.

Die Auffindung der Grössen m und M wird sehr erleichtert, wenn auch $f''(x)$ in dem Intervall a bis b nur Werte eines Zeichens hat. Denn dann erreicht $f'(x)$ seine äussersten Werte an den Grenzen a und b . Es sei z. B. $f(x) = \sin x - x \cos x$. In dem Intervall $4\pi + \frac{\pi}{4}$ bis $4\pi + \frac{\pi}{2}$ liegt eine und nur eine Wurzel. Denn $f(x)$ hat an den Grenzen des Intervalls entgegengesetzte Zeichen, und $f'(x) = x \sin x$ liegt zwischen $\left(4\pi + \frac{\pi}{4}\right) \frac{1}{\sqrt{2}}$ und $4\pi + \frac{\pi}{2}$. Nach dem Newton'schen Verfahren erhält man nun:

	$f(x)$	$f'(x)$	$\frac{f(x)}{f'(x)}$
1. Näherung: 4.5π	1	14	0.023π
2. Näherung: 4.477π	-0.018	14.03	-0.00041π
3. Näherung: 4.47741π	0.00006		

Der Fehler des dritten Näherungswertes ist kleiner als $\frac{f(x)}{m}$. Für m können wir $\left(4\pi + \frac{\pi}{4}\right) \frac{1}{\sqrt{2}} = 9.4$ annehmen, wonach also der Fehler

weniger als 7 Einheiten der 6^{ten} Decimale beträgt. Ähnliche Betrachtungen können wir auch anstellen, wenn es sich um mehrere Gleichungen mit mehreren Unbekannten handelt, wovon unten weiter die Rede sein wird.

Die Separation der Wurzeln.

2. Grenzen für die Wurzeln. Wenn keine Näherungswerte der Wurzeln von vorne herein bekannt sind, so geht der eigentlichen Berechnung das Aufsuchen der rohen Näherungswerte voraus. Hat man Intervalle aufgefunden, in denen je eine Wurzel liegt, so sagt man, die Wurzeln seien *separiert*. Wenn es sich um die Nullstellen einer ganzen rationalen Funktion $f(x) = a_0x^n + a_1x^{n-1} + \dots + a_n$ handelt, so kann man zunächst eine obere Grenze des absoluten Betrages der Wurzeln angeben. Ist M der grösste unter den absoluten Beträgen von a_1, a_2, \dots, a_n , so ist

$$\left| \frac{f(x)}{x^n} \right| > |a_0| - M(|x|^{-1} + |x|^{-2} + \dots + |x|^{-n}) = |a_0| - M \frac{1 - |x|^{-n}}{|x| - 1}.$$

Sobald daher für einen Wert von $|x|$ die rechte Seite positiv ist, so ist dieser Wert eine obere Grenze für die absoluten Beträge der Wurzeln. So ist insbesondere $1 + \frac{M}{|a_0|}$ eine obere Grenze. In manchen Fällen wird man eine kleinere obere Grenze finden können, wenn man diese Formel nicht auf x selbst anwendet, sondern $x = mu$ setzt, die obere Grenze für u ermittelt und diese mit m multipliziert. Bedeutet M' den grössten unter den absoluten Beträgen von $a_1, a_2, m^{-1}, a_3 m^{-2}, \dots, a_n m^{-n+1}$, so ist $m + \frac{M'}{|a_0|}$ eine obere Grenze der Wurzeln.

Setzt man $x = \frac{1}{z}$, so erhält man für z die Gleichung $a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0 = 0$. Die obere Grenze für $|z|$ liefert den reciproken Wert einer unteren Grenze für $|x|$. — Für die positiven und negativen Wurzeln allein kann man im allgemeinen noch engere Grenzen finden. Ist a_q der erste negative Koeffizient in der Reihenfolge $a_0 a_1 \dots a_n$ und a_r der grösste negative Koeffizient, so ist für positive Werte von x :

$$\begin{aligned} f(x)x^{-n+q-1} &> a_0 x^{q-1} + a_1 x^{q-2} + \dots + a_{q-1} + a_r (x^{-1} + \dots + x^{-n+q-1}) \\ &= a_0 x^{q-1} + \dots + a_{q-1} + a_r \frac{1 - x^{-n+q-1}}{x - 1}. \end{aligned}$$

Da die rechte Seite mit wachsendem x wächst, so ist jeder positive Wert von x , für den sie positiv ist, eine obere Grenze der positiven Wurzeln, z. B. wenn $a_0 x^{q-1} > \frac{|a_r|}{x-1}$ ($x > 1$) und also a fortiori, wenn

$a_0(x-1)^{q-1} > \frac{|a_r|}{x-1} (x > 1)$ oder $x-1 > \sqrt[q]{\frac{|a_r|}{a_0}}$. Verwandelt man x in $-x$, so liefert derselbe Satz eine untere Grenze der negativen Wurzeln. Es ist indessen nicht lohnend, viel Zeit auf eine genauere Bestimmung der Grenzen zu verwenden, die besser den unten zu entwickelnden Methoden der Separation und Approximation geschenkt wird.

3. Die Differenzengleichung. Um nun innerhalb des so bestimmten endlichen Gebietes die Wurzeln zu trennen, hat *Waring*²⁾ und nach ihm *Lagrange*²⁾ die Gleichung betrachtet, der die Differenzen je zweier Wurzeln genügen. Für eine Gleichung n^{ten} Grades genügen die Differenzen einer Gleichung vom $(n^2 - n)^{\text{ten}}$ Grade, die aber nur gerade Potenzen der Unbekannten enthält und sich daher als Gleichung vom Grade $\frac{n \cdot n - 1}{2}$ für die Quadrate der Differenzen darstellen lässt. Denkt man sich diese Gleichung nach bekannten Methoden gebildet und bestimmt eine untere Grenze ihrer positiven Wurzeln, so giebt die Quadratwurzel aus dieser Zahl eine untere Grenze für den Abstand zweier reeller Wurzeln der Gleichung an. Sei die Quadratwurzel nicht kleiner als Δ , so kann also in einem Intervall von der Grösse Δ nicht mehr als eine einzige Wurzel der Gleichung liegen. Man separiert daher die Wurzeln eines Intervalls a bis b , indem man die Werte von $f(a)$, $f(a + \Delta)$, $f(a + 2\Delta)$ etc. bis $a + n\Delta \geq b$ ausrechnet. Da sich nun ein Intervall angeben lässt, in dem alle reellen Wurzeln liegen, so ist damit die Aufgabe, die reellen Wurzeln zu separieren, „auf eine endliche Anzahl von Operationen zurückgeführt“. Dies Verfahren ist zwar ausführbar, und mit Hülfe der Differenzenrechnung [I E] lässt sich die Berechnung der Werte $f(a)$, $f(a + \Delta)$, $f(a + 2\Delta)$ etc. auf Additionen zurückführen; aber die Bildung der Gleichung, der die Quadrate der Wurzeldifferenzen genügen, wird für höhere Grade sehr umständlich. Nun hat *A. Cauchy* gelehrt, mit Hülfe der oberen Grenze für die absoluten Beträge der Wurzeln aus dem Differenzenprodukt allein eine untere Grenze des kleinsten Unterschiedes zweier Wurzeln zu finden³⁾. Ist nämlich P das Produkt der $\frac{n \cdot n - 1}{2}$ Differenzen und ρ die obere Grenze der Wurzeln, so ist jede Differenz absolut nicht grösser als

2) *E. Waring*, *Medit. algebr.* Cambr. 1770, Lond. Trans. 1779. *J. L. Lagrange*, de la resolution des équations numériques de tous les degrés. Paris 1798. Chap. 1.

3) *A. Cauchy*, *Analyse algébrique* [note III]; vgl. *A. Cauchy*, *Exercices de mathématiques*, 4. année, Paris 1829, p. 65.

2ϱ und daher, wenn \mathcal{A} der absolute Betrag der kleinsten Differenz ist, $|P| < \mathcal{A} \cdot (2\varrho)^{\frac{n \cdot n-1}{2}-1}$ oder $\mathcal{A} > |P|(2\varrho)^{-\frac{n \cdot n-1}{2}+1}$. Dieser Wert wird aber im allgemeinen sehr viel zu klein sein und verlangt viel unnötige Rechnung.

4. Descartes' Zeichenregel und Budan-Fourier's Satz. Die Berechnung einer ganzen rationalen Funktion $f(x) = a_0x^n + a_1x^{n-1} + \dots + a_{n-1}x + a_n$ für irgend einen Wert p lässt sich folgendermassen ausführen. Man berechnet nacheinander die Grössen b_1, b_2, \dots, b_n durch die Kette: $b_1 = a_1 + a_0p$, $b_2 = a_2 + b_1p$, $b_3 = a_3 + b_2p$, ..., $b_n = a_n + b_{n-1}p$. Das geschieht am besten nach dem Schema⁴⁾:

$$\begin{array}{ccccccccc} a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & \dots & a_{n-1} & a_n & & \\ & a_0p & b_1p & b_2p & & b_{n-2}p & b_{n-1}p & & \\ \hline & b_1 & b_2 & b_3 & \dots & b_{n-1} & b_n & & \end{array}$$

Dann ist

$$f(x) = b_n + (x-p)(a_0x^{n-1} + b_1x^{n-2} + b_2x^{n-3} + \dots + b_{n-2}x + b_{n-1})$$

und daher $b_n = f(p)$. Die Grösse b_n ist der Rest, der bei der Division von $f(x)$ durch $x - p$ bleibt, und $a_0b_1b_2 \dots b_{n-1}$ sind die Koeffizienten des Quotienten. Für genäherte Rechnungen, für welche die Genauigkeit des Rechenschiebers [I F] ausreicht, ist die Ausführung besonders bequem, da alle Multiplikationen bei derselben Stellung des Schiebers abgelesen werden. Wendet man auf den Quotienten dasselbe Verfahren noch einmal an:

$$\begin{array}{ccccccc} a_0 & b_1 & b_2 & \dots & b_{n-1} & b_n & \\ & a_0p & c_1p & & c_{n-2}p & & \\ \hline & c_1 & c_2 & & c_{n-1} & & \end{array}$$

so ist

$$f(x) = b_n + c_{n-1}(x-p) + (x-p)^2(a_0(x-p)^{n-2} + c_1(x-p)^{n-1} + \dots + c_{n-2}),$$

und man sieht, dass auf diese Weise nach und nach $f(x)$ nach Potenzen von $(x-p)$ entwickelt wird. Die Zahlen $b_n, c_{n-1}, d_{n-2}, \dots$ sind gleich $f(p), f'(p), \frac{f''(p)}{2!}, \dots$.

Unter der *Anzahl der Zeichenwechsel* einer Zahlenreihe $a_0a_1 \dots a_n$ versteht man die Anzahl, welche angiebt, wievielmals zwei benachbarte Grössen der Reihe verschiedenes Zeichen haben. Wenn einige der Grössen Null sind, so sind sie dabei als nicht vorhanden anzusehen, so dass zwei von Null verschiedene Grössen auch dann als

4) W. G. Horner, Lond. Trans. Part I. 1819, p. 308.

benachbart gelten, wenn sie durch Nullen getrennt sind. Wenn nun eine der Grössen z. B. a_α durch $a_\alpha + p a_{\alpha-1}$ ersetzt wird, wo p eine positive Grösse bedeuten soll, so kann dadurch offenbar die Zahl der Zeichenwechsel niemals zunehmen. Denn eine Änderung kann nur so eintreten, dass $a_\alpha + p a_{\alpha-1}$ Null wird oder dasselbe Zeichen annimmt wie $a_{\alpha-1}$, während a_α das entgegengesetzte Zeichen hat. Der Zeichenwechsel $a_{\alpha-1} a_\alpha$ geht dabei verloren. Wenn auf a_α noch eine von Null verschiedene Grösse folgt, so bleibt die Anzahl der Zeichenwechsel entweder ungeändert oder nimmt um zwei Einheiten ab. Wenn dagegen a_α die letzte von Null verschiedene Zahl ist, so wird für den Fall, dass $a_\alpha + p a_{\alpha-1}$ Null ist oder ein anderes Zeichen hat wie a_α , ein Zeichenwechsel verloren gehen. Daraus folgt, dass beim Übergange von $a_0 a_1 a_2 \dots a_{n-1} a_n$ zu $a_0 b_1 b_2 \dots b_{n-1} a_n$, wo $b_1 b_2 \dots b_{n-1}$ die oben definierten Werte haben, die Anzahl der Zeichenwechsel entweder unverändert bleibt oder sich um eine gerade Anzahl vermindert, wofern nur a_n von Null verschieden vorausgesetzt wird. Wenn ferner b_n entweder Null ist oder entgegengesetztes Vorzeichen hat wie a_n , so wird beim Übergang von $a_0 a_1 \dots a_n$ zu $a_0 b_1 b_2 \dots b_{n-1} b_n$ entweder ein Zeichenwechsel oder eine ungerade Anzahl von Zeichenwechseln verloren gehen. Betrachten wir zuerst den Fall $b_n = 0$. Hier ist p eine positive Wurzel der Gleichung $f(x) = 0$ und $a_0 b_1 b_2 \dots b_{n-1}$ sind die Koeffizienten der ganzen Funktion $n - 1^{\text{ten}}$ Grades, die nach dem Wegheben des Faktors $x - p$ übrig bleibt. Sind noch mehr positive Wurzeln vorhanden und hebt man nach einander die ihnen entsprechenden Faktoren fort, so vermindert sich dabei die Anzahl der Zeichenwechsel in der Reihe der Koeffizienten mindestens um die Zahl der positiven Wurzeln. Daher ist *die Zahl der positiven Wurzeln einer Gleichung höchstens gleich der Anzahl der Zeichenwechsel in der Reihe der Koeffizienten*. Dieser Satz ist als *Descartes' 5) Zeichenregel* bekannt. Nach dem Wegheben der den positiven Wurzeln entsprechenden Faktoren sind nur noch negative oder complexe Wurzeln übrig und daher keine Zeichenwechsel mehr in der Reihe der Koeffizienten vorhanden. Man kann daher Descartes' Zeichenregel dahin vervollständigen, dass die Zahl der positiven Wurzeln entweder gleich der Zahl der Zeichenwechsel oder um eine gerade Zahl geringer ist 6).

Wenn man $f(p + h)$ nach Potenzen von h entwickelt, so wird

5) R. Descartes, Geometria, Lugd. Bat. 1649, liber III; deutsch v. L. Schlesinger, Berlin 1894.

6) K. F. Gauss, Werke 3, p. 67.

die Reihe der Koeffizienten gleich: $\frac{f^n(p)}{n!}, \frac{f^{n-1}(p)}{(n-1)!}, \dots, f'(p), f(p)$.

Nach Descartes' Zeichenregel ist die Anzahl der positiven Wurzeln h der Gleichung $f(p+h)=0$ oder, was dasselbe ist, die Anzahl der den Wert p übersteigenden Wurzeln der Gleichung $f(x)=0$ höchstens gleich der Anzahl der Zeichenwechsel in der Reihe jener Koeffizienten. Jene Koeffizienten können, wie oben gezeigt wurde, aus der Reihe der Koeffizienten $a_0 a_1 \dots a_n$ berechnet werden, indem man wiederholt zu einer der Grössen die mit p multiplizierte vorhergehende Grösse hinzufügt. Daraus folgt, wenn p positiv ist, dass die Anzahl der Zeichenwechsel beim Übergang von $a_0 a_1 \dots a_n$ zu jenen Koeffizienten

d. i. von $\frac{f^n(0)}{n!}, \frac{f^{n-1}(0)}{(n-1)!}, \dots, f'(0), f(0)$ zu $\frac{f^n(p)}{n!}, \frac{f^{n-1}(p)}{(n-1)!}, \dots,$

$f'(p), f(p)$ nicht zunehmen kann und mindestens um eine Einheit oder eine grössere ungerade Zahl abnimmt, wenn das Vorzeichen von $f(p)$ dem von a_n entgegengesetzt ist. Setzt man in der Gleichung $f(x)=0$ das Binom $a+h$ an Stelle von x ein und wendet denselben Satz auf h an, so ergibt sich, dass die Anzahl der Zeichenwechsel

von $\frac{f^n(x)}{n!}, \frac{f^{n-1}(x)}{(n-1)!}, \dots, f'(x), f(x)$ beim Übergang von $x=a$ zu

$x=a+p$, sobald das Vorzeichen von $f(a+p)$ dem von $f(a)$ entgegengesetzt ist, mindestens um eine Einheit abnimmt, oder mit andern Worten, dass mit wachsendem x die Anzahl der Zeichenwechsel beim Passieren einer Wurzel der Gleichung um eine ungerade Zahl abnimmt und sonst nur um eine gerade Zahl abnehmen kann. Mithin ist die Zahl der Wurzeln der Gleichung $f(x)=0$, die zwischen einer beliebigen Zahl x_1 und einer grösseren Zahl x_2 liegen, entweder gleich der Anzahl der beim Übergang von x_1 zu x_2 in der Reihe

$\frac{f^n(x)}{n!}, \frac{f^{n-1}(x)}{(n-1)!}, \dots, f'(x), f(x)$ verlorenen Zeichenwechsel oder um

eine gerade Anzahl geringer⁷⁾. Für absolut grosse Werte von x überwiegt in jeder Funktion das Glied mit der höchsten Potenz. Für grosse negative Werte sind daher n Zeichenwechsel vorhanden, die beim Übergang zu grossen positiven Werten von x alle verloren gehen. Es gehen also genau so viel Zeichenwechsel verloren, wie die Gleichung reelle und imaginäre Wurzeln hat. Da nun für jede reelle Wurzel ein Zeichenwechsel verloren geht, so stimmt die Zahl der

7) *Dés. Budan*, Nouvelle méthode pour la résolution des équations numériques, 2. éd. Paris 1822. *J. B. J. Fourier*, Analyse des équations déterminées, Paris 1831, livre I. Über die Zeitfolge betr. *Budan* und *Fourier* vgl. *G. Darboux* in *Fourier's* ges. W. 2, p. 311. *J. P. de Gua*, Par. Mém. in 4^o, 1741, p. 459 u. f.

übrigen verlorenen Zeichenwechsel, die immer paarweise verloren gehen, mit der Zahl der komplexen Wurzeln, die ebenfalls paarweise zusammengehören. Fourier lässt jedem dieser Paare verlorener Zeichenwechsel ein ganz bestimmtes Paar konjugierter Wurzeln entsprechen⁸⁾. Er hat aber einen solchen Zusammenhang nicht nachgewiesen, wenn er auch vermutlich vorhanden ist.

Die Werte $\frac{f^n(p)}{n!}$, $\frac{f^{n-1}(p)}{(n-1)!}$, \dots , $f'(p)$, $f(p)$ werden, wie oben gezeigt, auch aus der Reihe $a_0 b_1 b_2 \dots b_{n-1} b_n$ durch fortgesetztes Addieren der mit p multiplizierten, jedesmal vorhergehenden Grösse abgeleitet. Da dabei, wie wir oben sahen, bei positivem p die Anzahl der Zeichenwechsel sich zwar vermindern aber nicht vergrössern kann, so folgt sofort, dass die Zahl der positiven Wurzeln, die den Wert p nicht übersteigen, höchstens gleich der Anzahl der Zeichenwechsel von $a_0 b_1 b_2 \dots b_n$ oder um eine gerade Anzahl kleiner ist. Dasselbe gilt von der Reihe $a_0 c_1 c_2 \dots c_{n-1} c_n$ u. s. w.⁹⁾. — Descartes' Zeichenregel giebt auch über die negativen Wurzeln der Gleichung einen gewissen Aufschluss. Man ersetze x durch $-x$. Dann gehen die positiven Wurzeln in negative über und umgekehrt. Wenn alle Koeffizienten von Null verschieden sind, so ergänzen sich die Anzahlen, die man in beiden Fällen erhält, zu n . Wenn aber einzelne Glieder fehlen, so können die beiden Anzahlen zusammen kleiner sein als n . Es muss dann eine entsprechende Anzahl komplexer Wurzeln vorhanden sein. — Wenn man den reciproken Wert von x in die Gleichung einführt, so kehrt sich die Reihenfolge der Koeffizienten um: $t^n f(t^{-1}) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n$. Berechnet man mit dieser neuen Reihenfolge $a_0 a_1 \dots a_n$ in derselben Weise wie oben durch Addieren der mit p multiplizierten vorhergehenden Grösse nach dem Schema:

$$\begin{array}{cccc}
 a_n & a_{n-1} & a_{n-2} & \dots & a_0 \\
 0 & a_n p & B_1 p & & B_{n-1} p \\
 \hline
 a_n & B_1 & B_2 & & B_n
 \end{array}$$

die Grössen $a_n B_1 B_2 \dots B_n$, so ist die Anzahl der Wurzeln von t , die den positiven Wert p übersteigen oder, was dasselbe ist, der positiven Wurzeln x , die nicht grösser sind als $\frac{1}{p}$, höchstens gleich der Anzahl der Zeichenwechsel dieser Reihe¹⁰⁾. Auch die Koeffizienten der Ent-

8) *J. B. J. Fourier*, l. c. livre I, art. 43.

9) Vergl. für diese Sätze *E. Laguerre*, *J. de Math.* (3) 9, (1883), p. 99 = oeu. p. 3. *Acta math.* 4 (1884), p. 97 = oeu. p. 184 [I B 2, Nr. 26, Anm. 424, 427].

10) *E. Laguerre*, *J. de Math.* (3) 9.

wicklung nach Potenzen von $(t - p)$ liefern ebenfalls eine obere Grenze, die, wie Nr. 2 gezeigt ist, zwar kleiner als jene sein kann, aber umständlicher zu berechnen ist. Wenn man erst $a + h$ statt x und dann $\frac{1}{t}$ statt h einführt, erhält man eine obere Grenze für die Wurzeln x zwischen a und $a + \frac{1}{p}$.¹¹⁾ Laguerre¹²⁾ hat Descartes' Zeichenregel auf unendliche Reihen ausgedehnt. Es möge die Reihenentwicklung $f(x) = \sum_{-\infty}^{+\infty} a_n x^n$ nur für $u < |x| < v$ konvergieren, und es sei p ein Wert zwischen u und v , für den $f(x)$ verschwindet. Dann ist auch $\frac{f(x)}{x - p}$ für denselben Konvergenzbereich entwickelbar:

$$\frac{f(x)}{x - p} = \sum_{-\infty}^{+\infty} b_n x^{n-1} \quad \text{wo} \quad b_n = a_n + a_{n+1}p + \dots \\ = -a_{n-1}p^{-1} - a_{n-2}p^{-2} - \dots$$

Für die Anwendung von Descartes' Zeichenregel kommt nur der Fall in Betracht, wo die Koeffizienten a eine endliche Anzahl von Zeichenwechseln darbieten, wo also von einem gewissen positiven Index r ab in der Reihe $a_r, a_{r+1}, a_{r+2} \dots$ kein Zeichenwechsel mehr vorkommt und ebenso von einem negativen Index $-s$ ab in der Reihe $a_{-s}, a_{-s-1}, a_{-s-2} \dots$ kein Zeichenwechsel mehr vorkommt. Dann haben auch alle Grössen der Reihe $b_r, b_{r+1}, b_{r+2}, \dots$ dasselbe Zeichen wie a_r, a_{r+1}, \dots , und alle Grössen der Reihe $b_{-s+1}, b_{-s}, b_{-s-1}, \dots$ das entgegengesetzte Zeichen wie $a_{-s}, a_{-s-1}, a_{-s-2}, \dots$. Die Zeichenwechsel in der Reihe der Koeffizienten a sind daher dieselben, wie die in der endlichen Reihe $b_r a_{r-1} a_{r-2} \dots a_0 a_{-1} \dots a_{-\lambda}$, wo λ nicht kleiner als s und so gewählt sein soll, dass $a_{-\lambda}$ nicht Null ist. Ebenso sind die Zeichenwechsel in der Reihe der Koeffizienten b dieselben, wie die in der endlichen Reihe $b_r b_{r-1} \dots b_0 b_{-1} \dots b_{-\lambda}$. Nun ist $b_n = a_n + p b_{n+1}$. Also ist der Übergang von der einen zur andern Reihe ein solcher, wie er oben betrachtet wurde. Da nun das Vorzeichen von $b_{-\lambda}$ dem von $a_{-\lambda}$ entgegengesetzt ist, so geht dabei eine ungerade Zahl von Zeichenwechseln verloren. Liegen zwischen u und v mehrere Wurzeln, und hebt man in derselben Weise die entsprechenden linearen Faktoren weg, so ergibt sich demnach eine Entwicklung, bei der die Anzahl der Zeichenwechsel mindestens um die Anzahl der Wurzeln geringer ist. Die Funktion hat dann in dem

11) K. G. J. Jacobi, Werke 3, p. 279 (J. f. Math. 13 [1834], p. 340) spricht denselben Satz in etwas anderer Form aus.

12) E. Laguerre l. c.

Intervall u bis v überall das gleiche Zeichen, und da in der Nähe von $x = u$ die Glieder mit grossem negativen Index, in der Nähe von $x = v$ die mit grossem positiven Index überwiegen, so müssen beide Gruppen von Koeffizienten das gleiche Zeichen besitzen. Mithin kann die Entwicklung nur eine gerade Zahl von Zeichenwechseln besitzen. Die Zahl der positiven Nullstellen der ursprünglichen Entwicklung ist daher der Anzahl ihrer Zeichenwechsel gleich oder um eine gerade Zahl geringer.

Man kann in der Entwicklung nach Potenzen von x auch gebrochene oder auch irrationale Exponenten zulassen. Auch für den Fall, wo die Glieder mit positiven Exponenten oder die mit negativen Exponenten nur in endlicher Anzahl vorhanden sind, bleibt der Beweis bestehen. Laguerre hat von dieser Erweiterung der Zeichenregel zahlreiche Anwendungen gemacht. Sei $f(x)$ eine ganze rationale Funktion von x , und u und v zwei positive Zahlen ($u < v$), welche die Gleichung $f(x) = 0$ nicht befriedigen. Dann kann man $\frac{f(x)}{(x-u)(x-v)}$ in eine Reihe nach positiven und negativen Potenzen von x entwickeln, die für $u < |x| < v$ und nicht weiter konvergiert. Die Anzahl der Wurzeln zwischen u und v ist dann höchstens gleich der Anzahl der Zeichenwechsel in der Reihe der Koeffizienten.

Entwickelt man $\frac{f(x)}{x-u}$ nach fallenden Potenzen von x , so ergeben sich die Koeffizienten $a_0 b_1 b_2 b_3 \dots b_n, b_{n+1} \dots$, wo $b_{n+1} = b_n u^2$. Von b_n ab sind keine Zeichenwechsel mehr vorhanden, so dass wir den schon oben abgeleiteten Satz wieder erhalten, dass die Anzahl der positiven Wurzeln, die grösser sind als u , die Zahl der Zeichenwechsel in der Reihe $a_0 b_1 \dots b_n$ nicht übersteigen kann. Nun kann man aber auch wiederholt durch $x - u$ dividieren und erhält z. B.

$$\begin{array}{cccc} a_0 & b_1 & b_2 & b_3 \dots \\ + a_0 u, & + c_1 u, & + c_2 u & \\ \hline a_0 & c_1 & c_2 & c_3 \dots \end{array}$$

Die Anzahl der Zeichenwechsel kann dabei nur abnehmen, bildet aber ebenfalls eine obere Grenze für die Anzahl der positiven Wurzeln, die den Wert u übersteigen. Bei irgend einem c z. B. c_α kann man auch schräg in die Reihe der b hinaufsteigen $\dots c_\alpha b_{\alpha+1} b_{\alpha+2} \dots$, wodurch wie oben gezeigt die Zahl der Zeichenwechsel nur zunehmen kann, also auch dann eine obere Grenze der Wurzeln darstellt. Denkt man sich durch immer höhere Potenzen von $(x - u)$ dividiert, zugleich aber den Wert von u immer kleiner angenommen dergestalt,

dass in $\frac{x^r f(x)}{(x-u)^r}$ das Produkt *ur* einen konstanten Wert z behält, so nähert sich für sehr grosse Werte von r der Ausdruck dem Grenzwert $f(x) \cdot e^{\frac{z}{x}}$. Die Zahl der positiven Wurzeln kann also nicht grösser sein, als die Anzahl der Zeichenwechsel in der Entwicklung von $f(x) \cdot e^{\frac{z}{x}}$ nach fallenden Potenzen von x . Den Wert z vergrössern heisst bei gleichem u den Wert von r vergrössern. Dabei kann die Anzahl der Zeichenwechsel nur abnehmen. Laguerre zeigt, dass für einen hinreichend grossen Wert von z die Zahl der Zeichenwechsel gerade gleich der Anzahl der positiven Wurzeln wird. Statt nach fallenden Potenzen von x kann man auch nach steigenden entwickeln, was mit der Vertauschung von x mit seinem reciproken Wert gleichbedeutend ist.

Newton¹³⁾ hat für die Gleichung $a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_n = 0$ den Satz aufgestellt, dass sie mindestens so viele komplexe Wurzeln besitzt, wie in der Reihe $a_0^2, \frac{1}{n} \cdot \frac{n-1}{2} a_1^2 - a_0 a_2, \frac{2}{n-1} \cdot \frac{n-2}{3} a_2^2 - a_1 a_3, \dots, \frac{n-1}{2} \cdot \frac{1}{n} a_{n-1}^2 - a_{n-2} a_n, a_n^2$ Zeichenwechsel vorkommen. Sylvester¹⁴⁾ fand den Beweis in einem allgemeineren Satze, der sich zu dem Newton'schen verhält wie das Theorem von Budan und Fourier zu Descartes' Zeichenregel.

Bei der Anwendung des Theorems von Budan und Fourier wird es häufig vorkommen, dass in einem Intervall zwei Zeichenwechsel verloren gehen und man nun nicht weiss, ob ihnen zwei reelle Wurzeln entsprechen oder nicht. Es mögen z. B. die letzten drei Zeichen der Reihe $f^{(n)}(x), f^{(n-1)}(x), \dots, f'(x), f(x)$ für $x = a$: $+$ $-$ $+$, für $x = b$: $+$ $+$ $+$ sein, während alle vorhergehenden Zeichen in beiden Reihen dieselben sind. Dann weiss man nach dem Vorhergehenden, dass $f'(x)$ in dem Intervall eine und nur eine reelle Wurzel hat; aber es ist nicht sicher, ob auch $f(x)$ in dem Intervall zwei reelle Wurzeln besitzt oder keine. $f''(x)$ kann in dem ganzen Intervall nur positiv sein; die Curve $y = f(x)$ ist mithin nach der Seite der wachsenden y konkav. Die beiden Ordinaten $f(a)$ und $f(b)$ sind positiv, und es fragt sich, ob nun die Kurve in dem Intervall ganz über der x -Achse liegt oder die x -Achse schneidet. Fourier¹⁵⁾ denkt sich die Tangenten konstruiert, deren Berührungspunkte zu den Ab-

13) J. Newton, Arithmetica universalis. Cambr. 1707. 2. ed. Lond. 1722. Cap. II.

14) J. J. Sylvester, Phil. Mag. (4) 31 (1866), p. 214.

15) J. B. J. Fourier, Analyse des équ. déterminées. Paris 1831. Liv. I, art. 25.

seissen a und b gehören, und sucht deren Schnittpunkte mit der x -Achse auf. Die Abscissen der Schnittpunkte sind $a - \frac{f(a)}{f'(a)}$ und $b - \frac{f(b)}{f'(b)}$ (zugleich die Näherungswerte nach Newton's Verfahren). Wenn $b > a$, dagegen $a - \frac{f(a)}{f'(a)} > b - \frac{f(b)}{f'(b)}$, so kreuzen sich die Tangenten vor der x -Achse und die Gleichung hat keine reellen Wurzeln zwischen a und b . Wenn $a - \frac{f(a)}{f'(a)} < b - \frac{f(b)}{f'(b)}$, so können zwischen diesen beiden Werten immer noch zwei Schnittpunkte der Kurve mit der x -Achse liegen. Man kann dann diese neuen engeren Grenzen an Stelle von a und b nehmen und analog mit ihnen verfahren; es sei denn, dass $f'(x)$ für die beiden neuen Werte das gleiche Vorzeichen hätte, woraus sogleich erhellen würde, dass keine Wurzeln in dem Intervall liegen. Besser ist es noch, einen Näherungswert c für die Wurzel von $f'(x)$, die zwischen a und b liegt, zu benutzen. Ist $f'(c) > 0$, so kann man mit Vorteil gleich c an Stelle von b nehmen, für $f'(c) < 0$ dagegen an Stelle von a . Analog ist die Untersuchung, wenn $f(a)$ und $f(b)$ beide negativ und $f''(x)$ in dem Intervall negativ ist.

Wenn zwischen a und b das Zeichen von $f''(x)$ noch wechselt, so geht man in der Reihe der Ableitungen zurück und verengert das Intervall, das eine Wurzel von $f'(x)$ einschliesst, zuerst so, dass kein Zeichenwechsel mehr eintritt. Das kann man durch genäherte Berechnung der Wurzel von $f''(x)$ u. s. w.

Das Verfahren kann langwierig werden, wenn die x -Achse nahe mit einer zu ihr parallelen Tangente zusammenfällt, und es wird illusorisch, wenn die Kurve die x -Achse berührt. Wollte man sich vergewissern, dass dieser Fall nicht eintritt, so müsste man zunächst feststellen, dass $f(x)$ und $f'(x)$ nicht gleichzeitig verschwinden. Durch genäherte Berechnungen würde dies schwer zu machen sein, falls die Wurzeln von $f(x)$ und $f'(x)$ einander nahe rücken, und wenn sie übereinstimmen, so kann man dies durch Näherungsrechnungen überhaupt nicht beweisen.

5. Der Sturm'sche Satz. Für den Fall, dass $f(x)$ eine ganze rationale Funktion ist, lässt sich durch das Verfahren des gemeinsamen Teilers volle Sicherheit gewinnen. Zugleich führt dies, wie Sturm¹⁶⁾ gezeigt hat, zu einem vollkommenen Mittel, die Zahl der reellen Wurzeln, die innerhalb eines Intervalls liegen, anzugeben und

16) J. K. Fr. Sturm, Bulletin de Férussac 11, 1829. — Par. Mém. Sav. [Étr.] 6 (1835).

sie dadurch auch zu trennen. Das Verfahren, den gemeinsamen Teiler zu finden, besteht darin, die folgende Kette von Gleichungen zu bilden:

$$\begin{aligned} f(x) &= q_1(x)f'(x) - r_1(x) \\ f'(x) &= q_2(x)r_1(x) - r_2(x) \\ r_1(x) &= q_3(x)r_2(x) - r_3(x) \\ &\text{etc.,} \quad [\text{I B 1 a, Nr. 12}] \end{aligned}$$

wo q_1, q_2, \dots die Quotienten und $-r_1, -r_2, \dots$ die Reste der Division sind. Ist der letzte von Null verschiedene Rest r_v eine Konstante, so haben $f(x)$ und $f'(x)$ keinen gemeinsamen Teiler. Im andern Fall stellt dieser Rest r_v den grössten gemeinsamen Teiler dar. Im ersten Fall giebt es keinen Wert von x , für den zwei benachbarte Funktionen der Reihe $f(x), f'(x), r_1(x), r_2(x), \dots, r_v$ gleichzeitig verschwinden. Zugleich geht aus der Kette von Gleichungen hervor, dass beim Verschwinden einer der Funktionen $f', r_1, r_2, \dots, r_{v-1}$ die beiden benachbarten Glieder der ganzen Reihe f, f', r_1, \dots, r_v entgegengesetztes Zeichen haben. Daher wird die Anzahl der Zeichenwechsel nur beim Verschwinden von f geändert und zwar geht mit wachsendem x jedesmal ein Zeichenwechsel verloren. Ist daher $x_2 > x_1$, so ist die Anzahl der Zeichenwechsel in der Reihe $f(x_2), f'(x_2), r_1(x_2), \dots, r_v$ vermindert um die Anzahl in der Reihe $f(x_1), f'(x_1), r_1(x_1), \dots, r_v$, gleich der Anzahl der Wurzeln zwischen x_1 und x_2 . Wenn in dem Intervall x_1 bis x_2 schon r_α sein Zeichen nicht wechselt, so braucht man offenbar nur die Reihe $f, f', r_1, \dots, r_\alpha$ zu betrachten. Wenn r_v nicht konstant ist, so ist die Anzahl der verlorenen Zeichenwechsel auch gleich der Zahl der Wurzeln zwischen x_1 und x_2 , wobei aber jede mehrfache Wurzel nur einmal gerechnet ist. Der Sturm'sche Satz ist nicht auf das Verfahren des grössten gemeinsamen Teilers beschränkt. Er gilt für jede Funktionsreihe $ff_1f_2 \dots f_n$, wenn 1) f_1 beim Verschwinden von f das Vorzeichen von f' hat, 2) beim Verschwinden einer der Funktionen $f_1 \dots f_{n-1}$ die benachbarten entgegengesetztes Zeichen haben und 3) f_n in dem betrachteten Intervall sein Zeichen nicht ändert. So bilden z. B. für die Säkulargleichung (I A 2, Nr. 26)

$$\begin{vmatrix} a_{11} - x, & a_{12}, & \dots & a_{1n} \\ a_{21}, & a_{22} - x, & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1}, & a_{n2}, & \dots & a_{nn} - x \end{vmatrix} = 0 \quad a_{ik} = a_{ki}$$

die Funktionen

$$f_\alpha = (-1)^\alpha \begin{vmatrix} a_{11} - x, & a_{12}, & \dots & a_{1n-\alpha} \\ a_{21}, & a_{22} - x, & \dots & a_{2n-\alpha} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n-\alpha, 1}, & \dots & \dots & a_{n-\alpha, n-\alpha} - x \end{vmatrix}, \quad f_n = (-1)^n$$

eine Sturm'sche Reihe, wie aus der Theorie der Determinanten gefolgert werden kann. Daraus ergibt sich sofort die Realität aller Wurzeln¹⁷⁾. — Die praktische Ausführung des Verfahrens des grössten gemeinsamen Teilers ist nicht beschwerlich, wenn man die Koeffizienten nur genähert berechnet, was im allgemeinen genügt. Man bedient sich dabei mit Vorteil des Rechenschiebers¹⁸⁾.

Betrachtet man die Koeffizienten einer Gleichung als veränderlich, so kann sich die Anzahl der reellen Wurzeln nur ändern, wenn zwei Wurzeln zusammenfallen, d. h. wenn die Discriminante (I B 1 a, Nr. 20 — 22; I B 2, Nr. 25, 26) verschwindet. Das Gebiet der Veränderlichen wird durch das Gebilde, auf dem die Discriminante verschwindet, in Teile geteilt, die den verschiedenen Anzahlen reeller Wurzeln entsprechen¹⁹⁾.

6. Cauchy's Integral. Zieht man komplexe Werte mit in Betracht, so giebt Cauchy's Integral Aufschluss über die Zahl der in einem Gebiete liegenden Wurzeln. Nach Cauchy (II B 1) ist die Zahl N der Nullpunkte einer Funktion $f(x)$ in einem Gebiete, wo sie sich regulär verhält,

$$N = \frac{1}{2\pi} \int \frac{f'(x)}{f(x)} \frac{dx}{i};$$

dabei ist das Integral über den Rand des Gebietes im positiven Sinne zu erstrecken und die Funktion ist auch auf dem Rande regulär und von Null verschieden vorausgesetzt. Man braucht nur die reellen Teile des Integrals zu beachten und hat, wenn φ das Argument von $f(x)$ bedeutet, $f(x) = \rho e^{\varphi i}$ und daher

$$\frac{f'(x)}{f(x)} \frac{dx}{i} = \frac{1}{i} d(\log f(x)) = \frac{1}{i} d(\log \rho) + d\varphi.$$

Der reelle Teil des Integrals drückt also die Zunahme des Argumentes von $f(x)$ aus. Um den Wert des Integrals zu finden, hat man nur das Argument von $f(x)$ für eine hinreichende Anzahl von Punkten des Randes auszurechnen. Die Punkte sind so dicht zu wählen, dass über die Zunahme des Arguments keine Zweideutigkeit bestehen kann. Bezeichnet M die obere Grenze von $\left| \frac{f'(x)}{f(x)} \right|$ in irgend einem Teil des Randes von der Länge s , so kann der Beitrag jedes unendlich kleinen Randteilchens zum reellen Teil des Integrals nicht grösser sein als Mds , und der ganze Beitrag des Randteiles s kann daher nicht

17) Siehe den Beweis bei *H. Weber*, Algebra 1, 2. Aufl. p. 307.

18) Vergl. das Beispiel in Nr. 9.

19) Vergl. *L. Kronecker*, Berl. Ber. 1878, p. 145 und *L. Kronecker*, Journ. für Mathematik 92 (1882), pag. 121 = Werke 2, p. 71, 386. *C. Fuerber*, Dissertation. Berlin 1889.

grösser sein als $M\delta$. Wählt man nun die Punkte des Randes so dicht, dass von einem Punkt zum nächsten $M\delta$ kleiner als π ist, so kann über die Zunahme des Argumentes keine Zweideutigkeit mehr existieren. Ferner braucht die Genauigkeit, mit der man das Argument von $f(x)$ für die einzelnen Punkte ausrechnet, nur so gross zu sein, dass die Summe der Änderungen des Argumentes bis auf einen Fehler von weniger als π bekannt ist. — Man kann die Änderung von φ auch allein durch Betrachtung der Vorzeichen des reellen und imaginären Teiles von $f(x)$ beurteilen. Denn es ist, wenn $f(x) = U + Vi$, $U = \rho \cos \varphi$ und $V = \rho \sin \varphi$. Das Vorzeichen von U und V bestimmt den Quadranten, in dem sich φ befindet. Da $\cos \varphi$ der Differentialquotient von $\sin \varphi$ ist, so wird V mit wachsendem φ wachsen, wenn U positiv ist, und abnehmen, wenn U negativ ist. Beim Verschwinden von V wird mithin die Kombination der Vorzeichen von V und U mit wachsendem φ einen Zeichenwechsel verlieren, mit abnehmendem φ einen Zeichenwechsel gewinnen. Wenn daher beim Durchlaufen des Randes im positiven Sinne die Funktion V p -mal ihr Zeichen so wechselt, dass V, U einen Zeichenwechsel verliert und q -mal so, dass V, U einen Zeichenwechsel gewinnt, so ist die Gesamtänderung von φ gleich $(p - q)\pi$ und die Zahl der Wurzeln im Gebiete also gleich $\frac{p - q}{2}$. Denn φ geht alsdann p -mal im wachsenden Sinne durch 0° oder 180° und q -mal im abnehmenden Sinne. Man kann in diesem Lehrsatz auch V mit U und U mit $-V$ vertauschen, da $if(x) = -V + Ui$ dieselben Nullstellen hat wie $f(x)$. Für den Fall, dass $f(x)$ eine ganze Funktion n^{ten} Grades ist, kann man auch schreiben:

$$f(x) = x^n [a_0 + a_1 x^{-1} + a_2 x^{-2} + \dots + a_n x^{-n}].$$

Für grosse Werte von $|x|$ wird der Klammerausdruck nahezu konstant. Die Änderung des Argumentes von $f(x)$ wird daher sehr nahe gleich der Änderung des Argumentes von x^n . Es folgt daraus, dass für ein Gebiet, auf dessen Rande $|x|$ hinreichend gross ist [Nr. 2], die Anzahl der Wurzeln gleich der Änderung des Argumentes von x^n dividiert durch 2π , also gleich n sein muss. Wenn das Gebiet auf der einen Seite von einer Geraden, auf der andern Seite von einem Kreisbogen begrenzt wird, der mit einem sehr grossen Radius um den Nullpunkt beschrieben ist und zwei Punkte der Geraden verbindet, so ist die Änderung von φ auf dem Kreisbogen für einen hinreichend grossen Radius beliebig wenig von $n\pi$ verschieden. Lässt man den Radius unendlich werden, so erhält man also den Satz, dass die Zahl der auf der einen Seite der Geraden liegenden Wurzeln gleich $\frac{n}{2}$ plus der

durch 2π dividierten Änderung des Argumentes von $f(x)$ längs der betrachteten Geraden ist. Die betreffende Seite der Geraden ist die zu dem Sinne, in dem sie durchlaufen wird, positive. Oder, wenn $f(x) = U + Vi$, so ist die Zahl der Wurzeln auf dieser Seite gleich $\frac{n}{2} + \frac{p-q}{2}$, wo p die Anzahl der Male anzeigt, dass V sein Zeichen beim Durchlaufen der Geraden wechselt, während V, U einen Zeichenwechsel verliert, und q die Anzahl der Male, dass V sein Zeichen wechselt, während V, U einen Zeichenwechsel gewinnt. Die Zahl $p-q$ findet man durch das Verfahren des grössten gemeinsamen Teilers ähnlich wie beim Sturm'schen Satz. Man setzt auf der Geraden $x = a + bt$, wo a und b zwei im allgemeinen komplexe Zahlen sind und t von $-\infty$ bis $+\infty$ läuft. U und V werden dann ganze rationale Funktionen von t . Im allgemeinen werden U und V von gleichem Grade sein; dann kann man das Verfahren durch Division von V durch U beginnen oder auch durch Division von U durch $-V$. Wenn dagegen eine von ihnen von höherem Grade ist, so hat man nur eine Möglichkeit. Man bildet nun die Kette von Gleichungen z. B.

$$V = q_1 U - r_1$$

$$U = q_2 r_1 - r_2$$

etc.

Die Reihe $V, U, r_1, r_2 \dots r_a$ kann dann mit wachsendem t nur dann die Anzahl der Zeichenwechsel ändern, wenn V verschwindet. Dabei wird, je nachdem V, U einen Zeichenwechsel verliert oder gewinnt, auch die Reihe einen Zeichenwechsel verlieren oder gewinnen. Folglich ist $p-q$ der Unterschied in der Anzahl der Zeichenwechsel der Reihe für $t = -\infty$ vermindert um die Anzahl für $t = +\infty$. Das Analoge gilt, wenn $U, -V$ an die Stelle von V, U gesetzt wird. Besonders einfach wird das Verfahren für den Fall reeller Koeffizienten von $f(x)$, wenn es auf irgend eine Senkrechte zur reellen Achse angewendet wird. Man setzt $x = a + ti$, wo a eine reelle Zahl ist. Da nun $f(x) = f(a) + f'(a)ti + \frac{f''(a)}{2}t^2i^2 + \dots$, so wird U nur grade Potenzen von t enthalten und V nur ungrade. Dadurch wird das Teilverfahren wesentlich abgekürzt. Für $n = 4$ wird z. B.:

$$U = At^4 - A_1t^2 + A_2, \quad -V = Bt^3 - B_1t,$$

$$r = Ct^2 - C_1, \quad r_2 = Dt, \quad r_3 = E,$$

wo

$$C = A_1 - \frac{AB_1}{B}, \quad C_1 = A_2, \quad D = B_1 - \frac{BC_1}{C}, \quad E = A_2.$$

Dabei ist vorausgesetzt, dass von den Grössen B, C, D, E keine ver-

schwindet. Andernfalls würde das Verfahren sich noch abkürzen. Die Anzahl der Wurzeln, deren reeller Teil kleiner ist als a , muss nun gleich $\frac{n}{2}$ vermehrt um die Hälfte der Zahl sein, die angiebt, wie viel Zeichenwechsel beim Übergang von $A, -B, C, -D, E$ zu A, B, C, D, E verloren gehen. Ist \mathfrak{F} die Zahl der Zeichenfolgen, \mathfrak{B} die der Zeichenwechsel in der Reihe A, B, C, D, E , so ist die Anzahl jener Wurzeln also gleich $\frac{n}{2} + \frac{\mathfrak{F} - \mathfrak{B}}{2}$ oder, da $n = \mathfrak{F} + \mathfrak{B}$, gleich \mathfrak{F} .

Es scheint zunächst, als wenn sich diese Betrachtungen bei einer reellen Funktion auf die reelle Achse selbst nicht anwenden liessen, weil hier der imaginäre Teil längs der ganzen Geraden verschwindet. Man kann aber eine Gerade annehmen, die der reellen Achse parallel ist, und kann sie ihr beliebig nahe rücken lassen. Setzt man $x = t - \varepsilon i$, wo ε eine sehr kleine positive Zahl sein soll, so wird mit Vernachlässigung der Glieder zweiter Ordnung $f(x) = f(t) - f'(t) \cdot \varepsilon \cdot i$ und daher $U = f(t)$, $-V = f'(t) \cdot \varepsilon$. Das Verfahren wird also mit dem Sturm'schen Verfahren identisch. $\frac{n}{2} + \frac{p-q}{2}$ liefert die Anzahl der reellen Wurzeln vermehrt um die Anzahl der komplexen Wurzelpaare. $p - q$ ist die Anzahl der reellen Wurzeln und $\frac{n - (p - q)}{2}$ ist die Anzahl der komplexen Wurzelpaare.

Auch für irgend ein gradlinig begrenztes Gebiet kann man in ähnlicher Weise die Wurzeln feststellen. Nur muss man dann für jede Seite die Werte von t , die den beiden Endpunkten entsprechen, einsetzen und die Änderung in der Zahl der Zeichenwechsel feststellen.

Den Ausnahmefall, dass U und V einen gemeinsamen Teiler haben, kann man ebenfalls einschliessen. Beim Durchgang durch eine Wurzel des gemeinsamen Teilers werden dann alle Funktionen der Reihe verschwinden und die Zahl der Zeichenwechsel wird dadurch nicht geändert. Man denke sich nun diese Wurzeln auf der Geraden durch kleine Ausweichungen vermieden, welche die Wurzeln auf der positiven Seite lassen. Bei jeder Wurzel erfährt dann das Argument von $f(x)$ einen Zuwachs von π , bei einer m -fachen Wurzel einen Zuwachs von $m\pi$. Ist daher $p - q$ die Zahl der bei dem ganzen Umgang verlorenen Zeichenwechsel und λ die Zahl der Wurzeln auf dem Rande (mehrfache Wurzeln mehrfach gerechnet), so ist die Änderung des Argumentes von $f(x)$, wenn alle auf dem Rande liegenden Wurzeln mit in das Gebiet eingeschlossen werden, gleich $(p - q)\pi + \lambda\pi$. Die Zahl der Wurzeln im Gebiet ist mithin $\frac{p-q}{2} + \frac{\lambda}{2}$. Für eine unend-

liche Gerade würde zu dieser Zahl, wie oben gezeigt, noch $\frac{n}{2}$ hinzuzufügen sein, um die Anzahl der auf der positiven Seite der Geraden liegenden Wurzeln zu erhalten, und λ würde einfach gleich dem Grade des grössten gemeinsamen Teilers sein.

7. Charakteristiken-Theorie. Alle diese Sätze sind spezielle Fälle einer allgemeineren Theorie, die sich auf die gemeinsamen Wertsysteme von mehreren Gleichungen zwischen mehreren reellen Veränderlichen bezieht²⁰⁾ (I B 1 b, Nr. 6 u. fg.). Es seien drei Gleichungen zwischen zwei reellen Veränderlichen gegeben $f(xy)=0$, $g(xy)=0$, $h(xy)=0$. f, g, h seien stetige Funktionen von x und y , die nur längs gewisser Kurven verschwinden, welche die Teile der Ebene von einander trennen, in denen die Funktionen verschiedene Zeichen haben. Die Kurven sollen aus einem oder mehreren geschlossenen Zügen bestehen, und es soll keinen Punkt geben, in dem gleichzeitig f, g, h verschwinden. Es handle sich zunächst um die Schnittpunkte der Kurven $f=0$ und $g=0$. Wir gehen auf der Curve $f=0$ entlang und betrachten die Schnittpunkte mit $g=0$. Die Richtung, in der wir auf der Curve $f=0$ fortschreiten, möge so bestimmt sein, dass das Gebiet, wo $f(xy)$ negativ ist, auf der positiven Seite liegt, d. h. es soll, wenn die Bogenlänge s in der Richtung des Fortschreitens wachsend angenommen wird,

$$\frac{dx}{ds} = -\frac{f_2}{\sqrt{f_1^2 + f_2^2}}, \quad \frac{dy}{ds} = \frac{f_1}{\sqrt{f_1^2 + f_2^2}}$$

sein (unter $f_1 f_2$ die partiellen Ableitungen nach x und y verstanden und die Wurzel positiv genommen). Dann ist

$$dg = g_1 dx + g_2 dy = (f_1 g_2 - f_2 g_1) \frac{ds}{\sqrt{f_1^2 + f_2^2}}.$$

Es wird mithin g zu- oder abnehmen, je nachdem $f_1 g_2 - f_2 g_1$ positiv oder negativ ist. Versteht man unter $\text{sign}\{ \}$ das Vorzeichen der zwischen den Klammern stehenden Grösse, so kann man schreiben

$$\text{sign}\{dg\} = \text{sign}\{f_1 g_2 - f_2 g_1\}.$$

Dabei ist zunächst angenommen, dass $f_1 g_2 - f_2 g_1$ in keinem der Schnittpunkte von $f=0$ und $g=0$ verschwindet. Durchläuft man nun die ganze Curve $f=0$ einmal und achtet bei allen Schnittpunkten mit der Curve $g=0$ darauf, ob g beim Durchgange zunimmt

20) *L. Kronecker*, Berl. Ber. 1869, p. 159, 668 und 1878, p. 145 = Werke 1, p. 175, 213; 2, p. 71. Der Fall mehrerer reeller Veränderlichen kann auch durch Elimination auf den einer Veränderlichen zurückgeführt werden. Die Bestimmung der Anzahl reeller Wurzelsysteme führt dabei auf den Sturm'schen Satz; vergl. *E. Phragmén*, Par. C. R. 114 (1892), p. 205; *É. Picard*, ib. p. 208.

oder abnimmt, so muss für alle Schnittpunkte $\sum \text{sign} \{dg\} = 0$, also $\sum \text{sign} \{f_1 g_2 - f_2 g_1\} = 0$ sein, weil g auf jedem geschlossenen Zug wieder zu seinem ursprünglichen Wert zurückkehrt. Werden an Stelle der Schnittpunkte mit der Kurve $g = 0$ zugleich die mit $g = 0$ und $h = 0$ betrachtet, so hat man nur gh an die Stelle von g zu setzen und hat

$$\sum \text{sign} \{d(gh)\} = 0, \\ f = 0, gh = 0,$$

oder, wenn man die Schnittpunkte $f = 0, g = 0$ von den Schnittpunkten $f = 0, h = 0$ trennt:

$$\sum \text{sign} \{d(gh)\} + \sum \text{sign} \{d(gh)\} = 0, \\ f = 0, g = 0 \quad f = 0, h = 0$$

Oder, da $d(gh) = h dg + g dh$ und folglich für $g = 0$ $d(gh) = h dg$, für $h = 0$ $d(gh) = g dh$ ist,

$$\sum \text{sign} \{h dg\} + \sum \text{sign} \{g dh\} = 0, \\ f = 0, g = 0 \quad f = 0, h = 0$$

oder

$$\sum \text{sign} \{h(f_1 g_2 - f_2 g_1)\} = \sum \text{sign} \{g(h_1 f_2 - h_2 f_1)\}, \\ f = 0, g = 0 \quad f = 0, h = 0$$

Betrachten wir ebenso die Durchschnittspunkte der Kurve $g = 0$ mit den Kurven $f = 0$ und $h = 0$, so finden wir auf dieselbe Weise:

$$\sum \text{sign} \{f(g_1 h_2 - g_2 h_1)\} = \sum \text{sign} \{h(f_1 g_2 - f_2 g_1)\}, \\ g = 0, h = 0 \quad g = 0, f = 0$$

oder beide Resultate vereinigend:

$$\sum_{g=0, h=0} \text{sign} \left\{ \begin{vmatrix} f & g & h \\ f_1 & g_1 & h_1 \\ f_2 & g_2 & h_2 \end{vmatrix} \right\} = \sum_{h=0, f=0} \text{sign} \left\{ \begin{vmatrix} f & g & h \\ f_1 & g_1 & h_1 \\ f_2 & g_2 & h_2 \end{vmatrix} \right\} = \sum_{f=0, g=0} \text{sign} \left\{ \begin{vmatrix} f & g & h \\ f_1 & g_1 & h_1 \\ f_2 & g_2 & h_2 \end{vmatrix} \right\}.$$

Die Zahl, die in diesen drei Formen dargestellt ist, muss grade sein. Denn zerlegt man die Summe $\sum \text{sign} \{h(f_1 g_2 - f_2 g_1)\}$ in die beiden Teile, für welche h einmal positiv und einmal negativ ist, so ist offenbar

$$\sum \text{sign} \{h(f_1 g_2 - f_2 g_1)\} = \sum \text{sign} \{f_1 g_2 - f_2 g_1\} - \sum \text{sign} \{f_1 g_2 - f_2 g_1\}. \\ f = 0, g = 0 \quad h > 0, f = 0, g = 0 \quad h < 0, f = 0, g = 0$$

Oben fanden wir aber

$$0 = \sum \text{sign} \{f_1 g_2 - f_2 g_1\} + \sum \text{sign} \{f_1 g_2 - f_2 g_1\}, \\ h > 0, f = 0, g = 0 \quad h < 0, f = 0, g = 0$$

folglich ist:

$$\sum_{f=0, g=0} \text{sign} \{h(f_1 g_2 - f_2 g_1)\} = -2 \sum_{h<0, f=0, g=0} \text{sign} \{f_1 g_2 - f_2 g_1\} = -2K.$$

Die Zahl K nennt *Kronecker* die *Charakteristik des Funktionen-systems* f, g, h . Wenn man die Schnittpunkte der Kurven $f=0$ und $g=0$, die in das Gebiet $h<0$ fallen, betrachtet und jeden je nach dem Vorzeichen von $f_1 g_2 - f_2 g_1$ positiv oder negativ rechnet, so ist die Charakteristik gleich der algebraischen Summe. Die Charakteristik kann nun nach dem obigen auch in der Form

$$-\frac{1}{2} \sum_{h=0, f=0} \text{sign} \{g(h_1 f_2 - h_2 f_1)\} = -\frac{1}{2} \sum_{h=0, f=0} \text{sign} \{g df\}$$

dargestellt werden. D. h. mit andern Worten, die Charakteristik ist nicht nur durch die Durchschnittspunkte von $f=0$ und $g=0$ im Gebiete $h<0$ bestimmt, sondern kann auch aus den Vorzeichen von f und g auf dem Rande des Gebietes $h<0$ berechnet werden. Da $\text{sign} \{g df\}$ gleich $+1$ oder -1 ist, je nachdem das Funktionenpaar f, g beim Passieren des Schnittpunktes $h=0, f=0$ einen Zeichenwechsel verliert oder gewinnt, so ist die Charakteristik gleich der halben Differenz der gewonnenen und der verlorenen Zeichenwechsel f, g , wenn man den Rand $h=0$ in dem angegebenen Sinne durchläuft und die Schnittpunkte mit der Kurve $f=0$ beachtet, oder auch gleich der halben Differenz der verlorenen und gewonnenen Zeichenwechsel f, g , wenn man die Schnittpunkte mit der Kurve $g=0$ beachtet. Wenn f und g auf dem Rande $h=0$ als ganze rationale Funktionen einer reellen Veränderlichen ausgedrückt werden können oder mit ganzen rationalen Funktionen auf dem ganzen Rande das gleiche Zeichen haben, so braucht man also nur auf diese ganzen Funktionen das Verfahren des gemeinsamen Teilers anzuwenden, um die Charakteristik zu finden. So ist es z. B., wenn f und g ganze Funktionen von x und y sind, für ein gradlinig begrenztes Gebiet möglich, den Wert der Charakteristik zu finden. Auf die analytische Darstellung der Funktion $h(xy)$ kommt dabei gar nichts an. Auch brauchen die Kurven $f=0$ und $g=0$ den Bedingungen der Kontinuität nur in dem Gebiet $h<0$ unterworfen zu sein. — Von der Voraussetzung, dass die Determinanten, z. B. $f_1 g_2 - f_2 g_1$, in den Schnittpunkten $f=0$ und $g=0$ nicht verschwinden sollen, kann man sich befreien. Man setze $f = v_1 h$ und $g = v_2 h$ an die Stelle von f und g . Dadurch wird die Determinante

$$\begin{vmatrix} f & g & h \\ f_1 & g_1 & h_1 \\ f_2 & g_2 & h_2 \end{vmatrix}$$

nicht geändert. Die Schnittpunkte $f=0$, $h=0$ und die Schnittpunkte $g=0$, $h=0$ werden auch nicht geändert, wohl aber die Schnittpunkte $f=0$, $g=0$. Ihre Koordinatenänderungen $dx dy$, die den Änderungen $dv_1 dv_2$ entsprechen, ergeben sich aus den Gleichungen:

$$(f_1 - v_1 h_1) dx + (f_2 - v_1 h_2) dy = h dv_1,$$

$$(g_1 - v_2 h_1) dx + (g_2 - v_2 h_2) dy = h dv_2.$$

Gesetzt nun, es bliebe die Determinante dieses Systems Null für alle Werte von v_1 und v_2 , die als Funktionen von x und y durch die Gleichungen $f - v_1 h = 0$, $g - v_2 h = 0$ mit x und y zusammenhängen, so müssten die Werte von $\frac{f}{h}$ und $\frac{g}{h}$ von einander abhängig sein.

Da man nun aber v_1 und v_2 beliebige Werte geben kann, so würde man dann die Wahl so treffen können, dass die Gleichungen $\frac{f}{h} = v_1$ und $\frac{g}{h} = v_2$ keine gemeinsamen Lösungen hätten. Mithin kann man

durch passende Annahme von v_1 und v_2 bewirken, dass, wenn überhaupt Schnittpunkte der Kurven $f - v_1 h = 0$, $g - v_2 h = 0$ vorhanden sind, die Funktionaldeterminante [I B 1 b, Nr. 21] in ihnen von Null verschieden ist. Das kann offenbar auch durch beliebig kleine Werte von v_1 und v_2 erreicht werden, da ja nur die Befriedigung gewisser Gleichungen zu vermeiden ist. Die Kurven $f=0$ und $g=0$ brauchen also nur beliebig wenig geändert zu werden. Nun kann man definieren, wie ein gemeinsamer Punkt der Kurven $f=0$, $g=0$ für die Charakteristik gezählt werden soll, wenn $f_1 g_2 - f_2 g_1$ für ihn verschwindet. Wenn für kleine Werte von v_1 und v_2 die Kurven $f - v_1 h = 0$, $f - v_2 g = 0$ keinen Schnittpunkt gemein haben, so ist der Punkt nicht zu zählen. Wenn dagegen aus diesem Punkt einer oder mehrere Schnittpunkte der Kurven $f - v_1 h = 0$, $g - v_2 h = 0$ hervorgehen, so ist jeder von ihnen je nach dem Zeichen der Funktionaldeterminante mit $+1$ oder -1 zu rechnen, und ihre algebraische Summe giebt die Zahl, die dem Schnittpunkt von $f=0$ und $g=0$ zukommt. Analoges gilt von den Punkten $f=0$, $h=0$ und $g=0$, $h=0$. Wenn dies geschieht, bleibt der Satz erhalten:

$$-\frac{1}{2} \sum \text{sign} \left\{ \begin{vmatrix} f & g & h \\ f_1 & g_1 & h_1 \\ f_2 & g_2 & h_2 \end{vmatrix} \right\} = \sum_{h < 0, f=g=0} \text{sign} \{f_1 g_2 - f_2 g_1\} = \text{etc.}$$

$f=g=0$ oder $g=h=0$ oder $f=h=0$

Bei kontinuierlichen Änderungen der drei Kurven kann sich die Charakteristik nicht ändern, wenn nicht alle drei Kurven sich in einem Punkte schneiden. Denn man kann, wie eben gezeigt, ohne Änderung der Charakteristik nötigenfalls die Kurven $f=0$ und $g=0$ so abändern, dass $f_1g_2 - f_2g_1$ von Null verschieden ist. Dann kann die Charakteristik sich nur dadurch ändern, dass bei der Änderung eines Schnittpunktes h sein Zeichen ändert. Je nachdem dabei $h(f_1g_2 - f_2g_1)$ abnimmt oder zunimmt oder, wie man auch sagen kann, je nachdem das Funktionenpaar $h, f_1g_2 - f_2g_1$ beim Übergang einen Zeichenwechsel gewinnt oder verliert, wird die Charakteristik um eine Einheit grösser oder kleiner. Denkt man sich die Koeffizienten von f, g, h als rationale Funktionen eines Parameters t , durch dessen Änderung die Veränderung der Kurven sich vollzieht, so kann die Bedingung, dass f, g, h gleichzeitig verschwinden, in der Form $R(t)=0$ ausgedrückt werden, wo $R(t)$ eine ganze rationale Funktion von t ist (I B 1 b, Nr. 14). Lässt man t sich verändern, so wird sich die Charakteristik nur beim Passieren einer Wurzel von $R(t)=0$ ändern. Andererseits kann man nun eine rationale Funktion bilden, die beim Passieren irgend einer der Wurzeln dasselbe Zeichen hat wie $h(f_1g_2 - f_2g_1)$. Man braucht nur die Summe

$$\sum \frac{1}{h(f_1g_2 - f_2g_1)}$$

über die sämtlichen reellen und komplexen Lösungen der Gleichungen $f=0$ und $g=0$ zu erstrecken. Diese rationale Funktion wird für $R(t)=0$ unendlich, ist also in der Form $\frac{F(t)}{R(t)}$ darstellbar, wo $F(t)$ nicht mehr für $R(t)=0$ unendlich wird. Ist $F(t)$ selbst keine ganze Funktion von t , so kann bekanntlich [I B 1 a, Nr. 2] eine ganze Funktion $G(t)$ gebildet werden, die für $R(t)=0$ mit $F(t)$ übereinstimmt:

$$G(t) = \sum \frac{F(t_r)}{R'(t_r)} \cdot \frac{R(t)}{t - t_r}.$$

Durch Anwendung des Teilverfahrens auf $G(t)$ und $R(t)$ kann berechnet werden, um wieviel Einheiten die Charakteristik bei einer Änderung von t zugenommen hat. Die Änderung ist gleich der Änderung in der Anzahl der Zeichenwechsel der Sturm'schen Reihe. Alle diese Sätze lassen sich auf beliebig viele Veränderliche ohne wesentliche Änderung übertragen²¹). Kronecker hat die Charakteristik auch durch ein Integral dargestellt, das über die Grenzen des Gebietes erstreckt wird analog dem Cauchy'schen Integral. Mit einem zweiten

21) L. Kronecker, Berl. Ber. 1878, p. 145 = Werke 2, p. 71.

von Kronecker angegebenen Integral gelingt es, die algebraische Summe der Werte einer beliebigen Funktion in den Nullstellen des Funktionensystems, die in das betrachtete Gebiet fallen, darzustellen. Der Wert der Funktion ist dabei in jeder Nullstelle mit dem Zeichen der Funktionaldeterminante [I B 1 b, Nr. 21] multipliziert. *Picard*²²⁾ hat zu dem von Kronecker betrachteten System noch eine weitere Veränderliche z und eine weitere Gleichung $zD = \text{Const.}$ hinzugezogen, wo D die Funktionaldeterminante bedeutet. Dadurch wird die Funktionaldeterminante des neuen Systems gleich D^2 und die Charakteristik wird gleich der absoluten Anzahl der Wertsysteme, die das von Kronecker betrachtete System zum Verschwinden bringen. Wie *Dyck*²³⁾ gezeigt hat, kann man sich bei der Kronecker'schen Verallgemeinerung des Cauchy'schen Integrals von dem Zeichen der Funktionaldeterminante frei machen, wenn man die Funktion mit einem Faktor versieht, welcher an den Nullstellen des Funktionensystems den Wert $+1$ oder -1 annimmt, je nachdem das Vorzeichen der Funktionaldeterminante positiv oder negativ ist. Als speziellen Fall erhält *Dyck* dann auch *Picard's* Formel für die absolute Anzahl der Wertsysteme.

8. Die quadratischen Formen im Zusammenhang mit dem Sturm'schen Satz. *Hermite*²⁴⁾ ersetzt das Sturm'sche Verfahren durch die Betrachtung gewisser quadratischer Formen. Sind $x_1 x_2 \dots x_n$ die Wurzeln der Gleichung $a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_n = 0$, die von einander verschieden vorausgesetzt werden, so bildet er die quadratische Form

$$\varphi = \sum_i (y_0 + x_i y_1 + x_i^2 y_2 + \dots + x_i^{n-1} y_{n-1})^2.$$

Als symmetrische Funktionen der Wurzeln sind die Koeffizienten dieser quadratischen Form reell, wenn $a_0 a_1 \dots a_n$ reell sind. Statt $y_0 y_1 \dots y_{n-1}$ werden nun neue reelle Veränderliche $u_1 u_2 \dots u_n$ eingeführt, indem für eine reelle Wurzel x_i $u_i = y_0 + x_i y_1 + \dots + x_i^{n-1} y_{n-1}$, für ein Paar konjugierter komplexer Wurzeln x_μ, x_ν dagegen $u_\mu + u_\nu i = y_0 + x_\mu y_1 + \dots + x_\mu^{n-1} y_{n-1}$ und $u_\mu - u_\nu i = y_0 + x_\nu y_1 + \dots + x_\nu^{n-1} y_{n-1}$ gesetzt wird. Da $x_1 x_2 \dots x_n$ von einander

22) *É. Picard*, Par. C. R. 113 (1891), p. 356, 669, 1012; *L. Kronecker*, ib. p. 1006; *É. Picard*, Journ. de Math. (4) 8 (1892), p. 5.

23) *W. Dyck*, Par. C. R. 119 (1894), p. 1254 u. ib. 120 (1895), p. 34, Münch. Ber. 25 (1895), p. 261, 447 u. ib. 28 (1898), p. 203.

24) *Ch. Hermite*, Par. C. R. 36 (1853), p. 294; vergl. auch *K. G. J. Jacobi's* nachgelassene Abhandlung Journ. f. Math. 53 (1857), p. 275 = Werke 3, p. 591. *Ch. Hermite*, ib. 52 (1856), p. 39 [I B 2, Nr. 3, Anm. 38].

verschieden sind, so ist die Determinante der linearen Funktionen $u_i, u_\mu \pm u_\nu i$ von Null verschieden, und es lassen sich y_0, y_1, \dots, y_{n-1} auch als lineare Funktionen von u_1, u_2, \dots, u_n ausdrücken. Nun ist $(u_\mu + u_\nu i)^2 + (u_\mu - u_\nu i)^2 = 2u_\mu^2 - 2u_\nu^2$. Die quadratische Form φ besteht also nach der Einführung der Veränderlichen u_1, u_2, \dots, u_n aus einer Summe von Quadraten mit positiven oder negativen Vorzeichen. Jede reelle Wurzel führt zu einem positiven Vorzeichen, jedes Paar komplexer Wurzeln zu einem positiven und einem negativen Vorzeichen, so dass die Anzahl der komplexen Paare gleich der Anzahl der negativen Vorzeichen und die Anzahl der reellen Wurzeln gleich dem Überschuss der Zahl der positiven über die der negativen Vorzeichen ist. Die Substitution der Veränderlichen u_1, u_2, \dots, u_n an Stelle von y_0, y_1, \dots, y_{n-1} kann man nun freilich ohne Kenntnis der Wurzeln nicht machen; aber es genügt, irgend eine reelle lineare Transformation der Veränderlichen zu machen, bei der die quadratische Form auf n Quadrate reduziert wird. Denn es gilt der Satz, dass dabei die Anzahlen der positiven und negativen Vorzeichen immer erhalten bleiben [I B 2, Nr. 3]. Bezeichnet s_γ die Summe $x_1^\gamma + x_2^\gamma + \dots + x_n^\gamma$, so ist

$$\varphi = \sum_{\alpha, \beta} s_{\alpha+\beta} y_\alpha y_\beta.$$

Nun kann man, wie in der Determinantentheorie [I A 2, I B 2, Nr. 3, I C 2] gezeigt wird, die quadratische Form z. B. auf die Form bringen

$$D_1 X_1^2 + \frac{D_2}{D_1} X_2^2 + \dots + \frac{D_n}{D_{n-1}} X_n^2,$$

wo

$$D_x = |s_{\alpha+\beta}| \quad \left(\begin{matrix} \alpha=0, 1, \dots, x-1 \\ \beta=0, 1, \dots, x-1 \end{matrix} \right).$$

Da nun $D_1 = n$ positiv ist, so ist die Anzahl der Paare komplexer Wurzeln gleich der Anzahl der Zeichenwechsel in der Reihe $D_1 D_2 \dots D_n$. Dies gilt auch noch, wenn von den Grössen $D_2 \dots D_{n-1}$ einige verschwinden, obgleich dann die Transformation in dieser Form nicht durchführbar ist. Die Grössen D_x lassen sich auch durch die Wurzeln ausdrücken. Denn D_x entsteht nach dem Multiplikationstheorem der Determinantentheorie [I A 2, Nr. 21] durch die Komposition der beiden rechteckigen Systeme:

$$\begin{array}{cccccc} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^{x-1} \\ x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_n & 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^{x-1} \\ x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & \dots & x_n^2 & \text{und} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{x-1} & x_2^{x-1} & x_3^{x-1} & \dots & x_n^{x-1} & 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^{x-1} \end{array}$$

Folglich ist

$$D_x = \sum |x_\lambda^\alpha|^2 = \sum \Pi (x_{\lambda_\alpha} - x_{\lambda_\beta})^2.$$

Jedes Glied der Summe bezieht sich dabei auf je x Wurzeln aus der Reihe $x_1 x_2 \dots x_n$ und die Summe ist über alle Kombinationen von je x von einander verschiedenen Wurzeln zu erstrecken²⁵⁾.

Für die quadratische Form

$$\varphi = \sum_{\lambda} \frac{1}{t - x_\lambda} (y_0 + x_\lambda y_1 + x_\lambda^2 y_2 + \dots + x_\lambda^{n-1} y_{n-1})^2$$

können analoge Betrachtungen durchgeführt werden. Statt $y_0 y_1 \dots y_{n-1}$ werden wieder die Veränderlichen $u_1, u_2, \dots u_n$ eingeführt. Einem Paar konjugierter Wurzeln x_μ, x_ν entsprechen die beiden Glieder

$$(t - x_\mu)^{-1} (u_\mu + u_\nu i)^2 + (t - x_\nu)^{-1} (u_\mu - u_\nu i)^2 = [(t - x_\mu)^{-1} + (t - x_\nu)^{-1}] (u_\mu^2 - u_\nu^2) + [i(t - x_\mu)^{-1} - i(t - x_\nu)^{-1}] 2u_\mu u_\nu.$$

Transformiert man diese Glieder für sich auf zwei Quadrate, so tritt immer ein positiver und ein negativer Koeffizient auf. Denn es ist, wenn $A \geq 0$,

$$A(u_\mu^2 - u_\nu^2) + 2Bu_\mu u_\nu = A\left(u_\mu + \frac{B}{A}u_\nu\right)^2 - A\left(1 + \frac{B^2}{A^2}\right)u_\nu^2$$

und, wenn $A = 0$ ist:

$$2Bu_\mu u_\nu = \frac{B}{2}(u_\mu + u_\nu)^2 - \frac{B}{2}(u_\mu - u_\nu)^2.$$

Einer reellen Wurzel x_λ entspricht das Glied $(t - x_\lambda)^{-1} u_\lambda^2$. Das giebt ein positives Zeichen, wenn $t > x_\lambda$, ein negatives, wenn $t < x_\lambda$ ist. Folglich ist die Anzahl aller negativen Zeichen gleich der Anzahl der reellen Wurzeln, die grösser sind als t , vermehrt um die Anzahl der Paare konjugierter Wurzeln. Setzt man daher erst einen Wert t_1 ein, dann einen grösseren Wert t_2 , so ist die Anzahl der negativen Vorzeichen für t_2 um die Zahl der zwischen t_1 und t_2 gelegenen reellen Wurzeln kleiner. Die Anzahl der negativen Vorzeichen erfährt man durch irgend eine reelle Transformation auf Quadrate. Dies kann z. B. wie oben geschehen. Setzt man

$$s'_\alpha = \sum_{\lambda} (t - x_\lambda)^{-1} x_\lambda^\alpha \quad \text{und} \quad D_x = |s'_{\alpha+\beta}| \quad (\alpha, \beta = 0, 1, \dots, x-1),$$

so ergibt sich die Anzahl der reellen Wurzeln zwischen t_1 und t_2 gleich der Anzahl der in der Reihe $1, D_1, D_2, \dots D_n$ beim Übergang von t_1 zu t_2 verlorenen Zeichenwechsel. Statt $(t - x_\lambda)^{-1}$ kann man

25) Vergl. die Formen, die *Sylvester* den Sturm'schen Funktionen gegeben hat: *Sylvester*, Phil. Mag. 15 (1839), p. 428; Lond. Trans. 1853, p. 511, wo für φ der Name „Bezoutiante“ eingeführt wird; *J. K. Fr. Sturm*, J. de Math. 7 (1842), p. 356.

auch irgend eine andere ungrade positive oder negative Potenz von $(t - x_\lambda)$ einsetzen. Für die erste Potenz wird $s_x' = s_x t - s_{x+1}$ und daher

$$D_x = |s_{\alpha+\beta} t - s_{\alpha+\beta+1}| = \begin{vmatrix} s_0 & s_1 & \dots & s_{x-1} & 1 \\ s_1 & s_2 & \dots & s_x & t \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ s_x & s_{x+1} & \dots & s_{2x-1} & t^x \end{vmatrix}^{26}.$$

Die Anwendung des Sturm'schen Verfahrens auf zwei beliebige ganze rationale Funktionen U und V kann ebenfalls durch die Betrachtung quadratischer Formen ersetzt werden. Man setzt

$$\varphi = \sum_{\lambda} \frac{U(x_\lambda)}{V'(x_\lambda)} (y_0 + x_\lambda y_1 + x_\lambda^2 y_2 + \dots + x_\lambda^{n-1} y_{n-1})^2.$$

Bei Einführung der Veränderlichen $u_1 u_2 \dots u_n$ entsprechen einem Paar konjugierter Wurzeln der Gleichung $V(x) = 0$ die Glieder

$$\frac{U(x_\mu)}{V'(x_\mu)} (u_\mu + u_\nu i)^2 + \frac{U(x_\nu)}{V'(x_\nu)} (u_\mu - u_\nu i)^2 = A(u_\mu^2 - u_\nu^2) + 2B u_\mu u_\nu,$$

die wieder, wie oben gezeigt, bei der Transformation auf Quadrate ein positives und ein negatives Vorzeichen liefern. Einer reellen Wurzel x_λ entspricht das Glied

$$\frac{U(x_\lambda)}{V'(x_\lambda)} u_\lambda^2.$$

Da nun in der Nähe von x_λ die Funktion $V(x)$ das Zeichen von $V'(x_\lambda)(x - x_\lambda)$ hat, so verliert oder gewinnt bei x_λ das Funktionenpaar V, U einen Zeichenwechsel, je nachdem $\frac{U(x_\lambda)}{V'(x_\lambda)}$ positiv oder negativ ist. Mithin ist für die ganze quadratische Form der Überschuss der Anzahl der positiven über die der negativen Quadrate gleich dem Verlust der Zeichenwechsel, den die Sturm'schen Funktionen erleiden, wenn x von $-\infty$ zu $+\infty$ übergeht. Wenn man den Quotienten $U(x)$ durch $V(x)$ nach fallenden Potenzen von x entwickelt:

$$\frac{U(x)}{V(x)} = g(x) + c_0 x^{-1} + c_1 x^{-2} + c_2 x^{-3} + \dots,$$

so ist

$$\varphi = \sum c_{\alpha+\beta} y_\alpha y_\beta.$$

26) Auch hier kann man ähnlich wie bei den oben aufgestellten Determinanten die Wurzeln einführen und alles durch Summen von Differenzenprodukten ausdrücken.

Denn es ist

$$\begin{aligned}\frac{U(x)}{V(x)} &= g(x) + \sum \frac{U(x_\lambda)}{V'(x_\lambda)} \frac{1}{x - x_\lambda} \\ &= g(x) + \sum \frac{U(x_\lambda)}{V'(x_\lambda)} x^{-1} + \sum \frac{U(x_\lambda)x_\lambda}{V'(x_\lambda)} x^{-2} + \dots\end{aligned}$$

Die Zahl der verlorenen Zeichenwechsel ist dann gleich dem Überschuss der Zeichenfolgen über die Zeichenwechsel in der Reihe

$$1, D_1, D_2, \dots D_n, \text{ wo } D_x = |c_{\alpha+\beta}|^{27) \quad (\alpha, \beta = 0, 1, \dots x-1).$$

9. Numerisches Beispiel für die Separation. Es soll nun ein Beispiel der Separation der reellen und komplexen Wurzeln einer Gleichung gegeben werden:

$$\begin{aligned}f(x) &= 3.22x^6 + 4.12x^4 + 3.11x^3 - 7.25x^2 + 1.88x - 7.84 = 0, \\ f'(x) &= 19.32x^5 + 16.48x^3 + 9.33x^2 - 14.50x + 1.88.\end{aligned}$$

Das Sturm'sche Verfahren wird mit dem Rechenschieber ausgeführt, was die Multiplikation einer ganzen Reihe von Zahlen mit einem Quotienten sehr schnell ausführen lässt. Die letzte Stelle der hingeschriebenen Koeffizienten ist nicht mehr sicher; sie ist aber auch zur Entscheidung über die Lage der Wurzeln nicht nötig.

$$\begin{aligned}r_1 &= -1.37x^4 - 1.55x^3 + 4.84x^2 - 1.57x + 7.84 \\ r_2 &= -109x^3 + 89.9x^2 - 121x + 123 \\ r_3 &= -4.16x^2 + 0.15x - 4.83 \\ r_4 &= -8.8x - 23.3 \\ r_5 &= +34.4.\end{aligned}$$

Das ergibt die Vorzeichen

$$\begin{aligned}x &= -\infty : + - - + - + + \\ x &= 0 : - + + + - - + \\ x &= +\infty : + + - - - - +.\end{aligned}$$

Es giebt daher nur zwei reelle Wurzeln, von denen die eine positiv, die andere negativ ist.

Um die komplexen Wurzeln zu trennen, werde zunächst $x = it$ eingesetzt und das Sturm'sche Verfahren auf den reellen und imaginären Teil angewendet:

$$\begin{aligned}U &= -3.22t^6 + 4.12t^4 + 7.25t^2 - 7.84 \\ -V &= 3.11t^5 - 1.88t \\ r_1 &= -8.56t^2 + 7.84 \\ r_2 &= -0.97t \\ r_3 &= -7.84.\end{aligned}$$

27) A. Hurwitz, Math. Ann. 46 (1895), p. 273 u. f. zeigt, wie die Grössen D_x direkt durch die Koeffizienten von U und V in Determinantenform ausgedrückt werden können.

Die Vorzeichen sind

$$t = -\infty : - - - + -$$

$$t = +\infty : - + - - - ,$$

$$\text{also } p - q = 0, \quad \frac{n}{2} + \frac{p-q}{2} = 3.$$

Es sind daher 3 Wurzeln mit negativem reellen Teil und folglich 3 Wurzeln mit positivem reellen Teil vorhanden. Je eine davon ist reell. Nun werde zunächst eine obere Grenze für den absoluten Betrag der Wurzeln bestimmt. Sobald

$$3.22|x|^6 > 7.84 \frac{|x|^5 - 1}{|x| - 1},$$

sind keine Wurzeln mehr möglich. Wenn $|x| > 1$, ist dies a fortiori für

$$3.22|x|^6 > 7.84 \frac{|x|^5}{|x| - 1}$$

oder

$$3.22|x| > \frac{7.84}{|x| - 1}$$

der Fall. Das liefert die obere Grenze 2.2. Um die komplexen Wurzeln zu isolieren, lege man durch den um den Nullpunkt mit dem Radius 2.2 beschriebenen Kreis die geraden Linien $x = 1 + ti$ und $x = -1 + ti$ und bestimme für beide die Anzahlen der Wurzeln auf der positiven Seite. Für $f(1 + ti) = U + Vi$ wird:

$$\begin{aligned} U &= -3.22t^6 + 52.42t^4 - 75.10t^2 - 2.76 \\ -V &= -19.32t^5 + 83.99t^3 - 32.51t \\ r_1 &= -38.44t^4 + 69.69t^2 + 2.76 \\ r_2 &= -49.0t^3 + 33.9t \\ r_3 &= -43.2t^2 - 2.76 \\ r_4 &= -37.0t \\ r_5 &= +2.76. \end{aligned}$$

Die Vorzeichen sind:

$$t = -\infty : - + - + - + +$$

$$t = +\infty : - - - - - + +$$

$$p - q = 4, \quad \frac{n}{2} + \frac{p-q}{2} = 5.$$

Für $f(-1 + ti) = U + Vi$ wird:

$$\begin{aligned} U &= -3.22t^6 + 52.42t^4 - 56.44t^2 - 12.74 \\ -V &= 19.32t^5 - 77.77t^3 + 10.09t \\ r_1 &= -39.47t^4 + 54.7t^2 + 12.74 \\ r_2 &= 51.0t^3 - 16.3t \\ r_3 &= -42.1t^2 - 12.74 \\ r_4 &= 31.7t \\ r_5 &= +12.74. \end{aligned}$$

Die Vorzeichen sind:

$$t = -\infty : - - - - - +$$

$$t = +\infty : - + - + - + +$$

$$p - q = -4, \quad \frac{n}{2} + \frac{p-q}{2} = 1.$$

Die negative Wurzel ist daher algebraisch kleiner als -1 , ein Paar konjugierter Wurzeln liegt zwischen den Geraden $x = -1 + ti$ und $x = ti$ und das zweite Paar zwischen den Geraden $x = ti$ und $x = 1 + ti$. Die positive Wurzel ist grösser als 1. Alle Wurzeln sind absolut kleiner als 2.2.

Die Approximation der Wurzeln.

10. Das Newton'sche Verfahren. Anstatt durch die bisher auseinandergesetzten Methoden die Isolation der Wurzeln vorzunehmen, kann man auch ohne weitere Vorbereitung durch eine überschlägige tabellarische Berechnung der zum Verschwinden zu bringenden Funktion oder auf graphischem Wege Näherungswerte gewinnen²⁸⁾. Für die reellen Wurzeln wird dies im allgemeinen vorzuziehen sein. Sobald die Wurzeln angenähert bekannt sind, lassen sich durch das Newton'sche Verfahren, wie oben bemerkt, genauere Werte finden. Die Annäherung ist eine rasche, sobald es sich nur noch um Intervalle handelt, in denen die Funktion sehr nahe linear ist. Auch für die Berechnung komplexer Wurzeln bleibt das Verfahren gültig, und der Überschlag der erreichten Genauigkeit ist ähnlich zu machen.

Statt wie beim Newton'schen Verfahren die Funktion durch eine lineare Funktion zu ersetzen²⁹⁾ und dadurch einen Näherungswert zu finden, könnte man auch eine ganze Funktion zweiten oder höheren Grades an Stelle von $f(x)$ nehmen und als Näherungswert eine der Wurzeln der Gleichung zweiten oder höheren Grades annehmen. Das würde z. B. mit Vorteil angewendet werden können, wenn zwei oder mehr Wurzeln nahezu einander gleich sind.

11. Allgemeinere Verfahren. Eine allgemeinere Art der successiven Annäherung, von der das Newton'sche Verfahren als spezieller

28) R. Mehmke, Civilingenieur (2) 35, p. 617 und Zeitschrift Math. Phys. 36 (1891), p. 158; vergl. ferner den Art. IF über graphisches Rechnen.

29) Geometrisch gesprochen ersetzt Newton die Kurve $y = f(x)$ durch ihre Tangente. Man kann sie auch durch eine Sehne ersetzen, z. B. indem man zwei Punkte der Kurve berechnet (Regula falsi). Vgl. die Darstellung bei H. Weber. Wegen des Ausdrucks „Regula falsi“ s. M. Cantor, Gesch. d. Math. 1 (1. Aufl.), p. 524, 628.

Fall betrachtet werden kann, ist das folgende. Es habe die Gleichung die Form $x = \varphi(x)$, und es werde vorausgesetzt, dass die rechte Seite sich für Werte von x , die in der Umgebung einer der Wurzeln liegen, nur langsam ändern möge. Ist $|\varphi'(x)|$ für alle Werte von x , die der Wurzel näher liegen als ein Näherungswert a , kleiner als m , so liegt $\varphi(x)$ zwischen $\varphi(a) + m(x - a)$ und $\varphi(a) - m(x - a)$. Setzt man also $a_1 = \varphi(a)$, so ist für die Wurzel $|x - a_1| < m|x - a|$. Wenn daher m ein echter Bruch ist³⁰⁾, so muss der Fehler von a_1 ein Bruchteil des Fehlers von a sein. Wenn man mit a_1 ebenso verfährt, so erhält man für einen dritten Näherungswert $a_2 = \varphi(a_1)$:

$$|x - a_2| < m_1|x - a_1|,$$

wo $m_1 \leq m$. Sei z. B. eine Wurzel der Gleichung $x = \arctg x$ zu berechnen. Der Differentialquotient der rechten Seite ist $(1 + x^2)^{-1}$. Kommen also z. B. nur Werte von x in Betracht, deren absoluter Betrag grösser ist als 10, so ist $m < 0.01$. Der Fehler wird sich dann bei jedem Schritt auf weniger als den hundertsten Teil des vorigen Fehlers vermindern. Wird $a = 10$ angenommen, so ist $a_1 = \arctg 10 = 3.46828\pi$ und $a_2 = \arctg a_1 = 3.47087\pi$. Die Wurzel liegt zwischen 3π und 4π , da die Tangente in diesem Intervall alle Werte durchläuft. Folglich ist der Fehler von a kleiner als π und mithin der von a_2 kleiner als 0.0001π . Das erlaubt aber wieder den Schluss, dass der Fehler von a kleiner ist als $3.48\pi - 10$, also kleiner als 0.3π und daher der Fehler von a_2 kleiner als 0.00003π , abgesehen von dem Fehler, der durch die Abkürzung der Rechnung auf 5 Dezimalen hinzutritt.

Diese Methode wird in der Astronomie häufig angewendet. Wenn man z. B. aus einer Mondistanz die Greenwicher Zeit berechnet, so kommt in der Reduktion der Distanz selbst die Greenwicher Zeit vor. Aber das Resultat ändert sich nur wenig, wenn dabei eine etwas andere Greenwicher Zeit benutzt wird. Man rechnet daher mit einem Näherungswert, und wenn sich dann als Resultat eine Greenwicher Zeit ergibt, die wesentlich von dem Näherungswert abweicht, so wiederholt man die Rechnung mit der gefundenen Greenwicher Zeit. Dabei ist der Wert von m in der Regel so klein, dass höchstens eine Wiederholung nötig ist.

Das Newton'sche Verfahren kann als spezieller Fall dieser Rech-

30) W. Wagner, Best. der Genauigkeit des Newton'schen Verfahrens. Berlin, lat. 1855, deutsch 1860. E. Schroeder, Math. Ann. 2 (1870), p. 317. Dieselben Resultate sind später von C. Isenkrahe, Math. Ann. 31 (1888), p. 309 gefunden; vergl. auch E. Netto, Math. Ann. 29 (1887), p. 141.

nungsweise angesehen werden, indem man statt der Gleichung $f(x)=0$ die gleichwertige Gleichung setzt:

$$x = x - \frac{f(x)}{f'x}.$$

Der Differentialquotient der rechten Seite ist

$$\frac{f \cdot f''}{f'^2},$$

der, sobald eine hinreichende Annäherung an die Wurzel erreicht ist, beliebig klein wird. Liegt für die betrachteten Werte von x der absolute Betrag von $f'(x)$ zwischen zwei von Null verschiedenen Grenzen $\kappa < |f'(x)| < K$ und ist $|f''(x)| < M$, so ist, wenn x eine Wurzel der Gleichung $f(x) = 0$ bedeutet, $|f(a)| < K|x - a|$ und daher

$$\left| \frac{f(a)f''(a)}{f'(a)^2} \right| < \frac{K \cdot M}{\kappa^2} |x - a|.$$

Mithin ist für den nächsten Näherungswert a_1

$$|x - a_1| < \frac{K \cdot M}{\kappa^2} |x - a|^2 \quad 31)$$

oder

$$\frac{K \cdot M}{\kappa^2} |x - a_1| < \left(\frac{K \cdot M}{\kappa^2} |x - a| \right)^2$$

und daher für den $n + 1^{\text{ten}}$ Näherungswert a_n

$$\frac{K \cdot M}{\kappa^2} |x - a_n| < \left(\frac{K \cdot M}{\kappa^2} |x - a| \right)^{2^n}.$$

Der Exponent auf der rechten Seite wächst z. B. nach zehn Schritten auf 1024. Sobald also $\frac{K \cdot M}{\kappa^2} |x - a|$ nur einigermassen kleiner ist als 1, so ist die Konvergenz rasch. Zugleich lässt diese Formel überschlagen, auf wie viel Dezimalen es sich bei jedem einzelnen Schritte lohnt die neue Annäherung auszurechnen. Dabei kommt es auf eine genaue Bestimmung von κ , K und M nicht an. Sei z. B. die positive Wurzel der Gleichung

$$3.22x^6 + 4.12x^4 + 3.11x^3 - 7.25x^2 + 1.88x - 7.84 = 0$$

zu berechnen. Die Wurzel liegt, wie wir oben fanden, zwischen 1 und 2.2. Der erste Näherungswert werde gleich 1 genommen. Dann

31) Vgl. *J. B. J. Fourier*, Analyse des équations déterminées, Paris 1831, livre II, art. 22. Bis auf Grössen höherer Ordnung ist sogar $x - a_1 = -\frac{(x-a)^2}{2} \cdot \frac{f''(x)}{f'(x)}$, was man bei grosser Annäherung statt $|x - a_1| < \frac{K \cdot M}{\kappa^2} |x - a|^2$ nehmen kann.

ist $-\frac{f'(1)}{f''(1)} = \frac{2.76}{32.51}$, und da $f'(x)$ mit wachsendem x zunimmt, so ist der Fehler des Näherungswertes 1 kleiner als $\frac{2.76}{32.51}$, sagen wir kleiner als 0.1. Nun kann für $\frac{KM}{x^2}$ etwa 5, also für $\frac{KM}{x^2} |x - a|$ etwa $\frac{1}{2}$ gesetzt werden. Der Fehler der Annäherungen nimmt also ungefähr ab wie die Reihe: 2^{-1} , 2^{-3} , 2^{-7} , 2^{-15} , 2^{-31} . Man wird daher bei den ersten beiden Annäherungen nur auf ein oder zwei Dezimalen genau rechnen, bei der vierten auf 5 oder 6 Dezimalstellen und bei der fünften würde es sich lohnen, auf 10 Stellen genau zu rechnen:

a	$f(a)$	$f'(a)$
$a_1 = 1.1$	+ 1.32	+ 50.3
$a_2 = 1.07$	− 0.086	+ 44.3
$a_3 = 1.072$	+ 0.0028	+ 44.7
$a_4 = 1.07194$		

Die geringere Genauigkeit der ersten Annäherung erlaubt die Anwendung des Rechenschiebers.

12. Horner's Schema. Diese Betrachtungen galten für beliebige Funktionen. Für den Fall einer ganzen rationalen Funktion hat Horner³²⁾ ein bequemes Schema zur Ausführung des Newton'schen Verfahrens gegeben. Schon oben Nr. 4 ist das Horner'sche Schema gegeben, nach dem bei einer ganzen rationalen Funktion nach einander die Koeffizienten $f(p)$, $f'(p)$, $\frac{f''(p)}{2!}$ etc. gefunden werden können. Sie sind die Koeffizienten der Gleichung, der die Verbesserung $x - p$ der Annäherung p genügen muss. Enthält p nur eine von Null verschiedene Ziffer, so sind alle Multiplikationen einfach, und wenn nun p der Wurzel hinreichend nahe ist, so liefert $-\frac{f''(p)}{f'(p)}$ die nächste Ziffer q , die nun für die Koeffizienten der neuen Gleichung dieselbe Rolle spielt wie p für die Koeffizienten der ursprünglichen Gleichung. So fortfahrend findet man Ziffer auf Ziffer.

32) W. G. Horner, Lond. Trans. 1819, part. I, p. 308, ferner Mathematical Repository 5, 2. Teil (London 1830). J. R. Young, on the theory and solution of algebraical equations. 1. Aufl. London 1835. 2. Aufl. London 1843.

Beispiel:

$$3.22x^6 + 4.12x^4 + 3.11x^3 - 7.25x^2 + 1.88x - 7.84 = 0,$$

 $p = 1$

3.22	0	4.12	3.11	- 7.25	1.88	- 7.84
3.22	3.22	7.34	10.45	3.20	5.08	
3.22	7.34	10.45	3.20	5.08	- 2.76	
3.22	6.44	13.78	24.23	27.43		
6.44	13.78	24.23	27.43	32.51		
3.22	9.66	23.44	47.67			
9.66	23.44	47.67	75.10			
3.22	12.88	36.32				
12.88	36.32	83.99				
3.22	16.10					
16.10	52.42					
3.22						
19.32						

Es ist nicht nötig, die neuen Koeffizienten noch einmal hinzuschreiben.
Es geschieht hier nur der Auseinandersetzung wegen.

$$q = \frac{2.76}{32.51} = 0.08$$

3.22	19.32	52.42	83.99	75.10	32.51	- 2.76
	0.2576	1.5662	4.3189	7.0647	6.5732	3.1267
	19.5776	53.9862	88.3089	82.1647	39.0832	+

Das positive Zeichen beweist, dass die Verbesserung $q = 0.08$ zu gross ist. Die Rechnung wird nun nach Horner mit 0.07 wiederholt. In den ersten Koeffizienten führen wir nur 4 Dezimalen.

3.22	19.32	52.42	83.99	75.10	32.51	- 2.76
	0.2254	1.3682	3.7652	6.1429	5.68700	2.673790
	19.5454	53.7882	87.7552	81.2429	38.19700	- 0.086210
	0.2254	1.3840	3.8621	6.4132	6.13593	
	19.7708	55.1722	91.6173	87.6561	44.33293	
	0.2254	1.3997	3.9600	6.6904		
	19.9962	56.5719	95.5773	94.3465		
	0.2254	1.4155	4.0591			
	20.2216	57.9874	99.6364			
	0.2254	1.4313				
	20.4470	59.4187				
	0.2254					
	20.6724					

Beim weiteren Rechnen vermindert sich nun der Einfluss der vorhergehenden Koeffizienten auf die folgenden immer mehr, so dass man sich bei den ersten Koeffizienten auf immer weniger Stellen beschränken kann, ohne die Genauigkeit der letzten zu beeinträchtigen. Die nächste Verbesserung ist 0.001.

3.22	20.67	59.42	99.64	94.346	44.3329	—	0.086210
	0.00	0.02	0.06	0.100	0.0944		0.044427
	20.67	59.44	99.70	94.446	44.4273	—	0.041783
		0.02	0.06	0.100	0.0945		
		59.46	99.76	94.546	44.5218		
		0.02	0.06	0.100			
		59.48	99.82	94.646			
		0.02	0.06				
		59.50	99.88				
		0.02					
		59.52					Verbesserung: 0.0009

3.22	20.7	59.5	99.9	94.646	44.5218	—	0.041783
			0.05	0.090	0.0853		0.040146
			100.	94.736	44.6071	—	0.001637
				0.090	0.0853		
				94.826	44.69		
				0.09			
				94.9			Verbesserung: 0.0000366

3.22	20.7	59.5	100	94.9	44.69	—	0.001637
					0.00		1341
							296
							268
							28

Die letzten Ziffern werden durch fortgesetzte Division gefunden, da jetzt der vorletzte Koeffizient 44.69 so weit, wie er hier in Betracht kommt, durch die vorhergehenden nicht geändert wird. Die Wurzel ist 1.0719366.

Horners Verfahren lässt sich auch vortrefflich mit der Methode von *Lagrange*³³⁾ verbinden, wonach die Wurzel in einen Kettenbruch entwickelt wird. Man bestimmt jedesmal die nächst kleinere ganze Zahl a , setzt $x = a + \frac{1}{y}$ und betrachtet dann die Gleichung für y .

33) *J. L. Lagrange*, de la résol. des équations numériques de tous les degrés. Paris 1798. Chap. III.

Hier kommt es dann auf die grösste Wurzel an, für die wieder die nächst kleinere ganze Zahl bestimmt wird. Die Rechnung ist wie bei Horner, nur sind bei jedem Schritt die Koeffizienten in der umgekehrten Reihenfolge zu nehmen. Der zweite Koeffizient dividiert durch den ersten giebt einen Näherungswert für die grösste Wurzel.

13. Bernoulli's Verfahren. Für den Fall, dass $f(x)$ eine ganze rationale Funktion ist, hat D. Bernoulli³⁴⁾ eine Methode zur Berechnung der Wurzeln gegeben, welche die Separation nicht voraussetzt. Sind $x_1 x_2 \dots x_n$ die Wurzeln der Gleichung $f(x) = 0$ und bedeutet s_λ die Summe $x_1^\lambda + x_2^\lambda + \dots + x_n^\lambda$, so kann man schreiben:

$$\frac{s_\lambda}{s_{\lambda-1}} = x_1 \frac{1 + \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^\lambda + \dots + \left(\frac{x_n}{x_1}\right)^\lambda}{1 + \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^{\lambda-1} + \dots + \left(\frac{x_n}{x_1}\right)^{\lambda-1}}.$$

Ist nun x_1 dem absoluten Betrage nach grösser als $x_2 \dots x_n$, so wird für grosse Werte von λ der Quotient $\frac{s_\lambda}{s_{\lambda-1}}$ sehr wenig von x_1 verschieden sein. Bedeutet andererseits σ_λ die Summe $x_1^{-\lambda} + x_2^{-\lambda} + \dots + x_n^{-\lambda-1}$ und ist x_n die absolut kleinste Wurzel, so folgt ebenso, dass für grosse Werte von λ der Quotient $\frac{\sigma_{\lambda-1}}{\sigma_\lambda}$ sehr wenig von x_n verschieden ist. Die Werte der Grössen s_λ und σ_λ erhält man durch Entwicklung von $\frac{f'(x)}{f(x)}$ nach negativen und positiven Potenzen von x . Denn es ist [I B 3 b Nr. 4]:

$$\frac{f'(x)}{f(x)} = nx^{-1} + s_1 x^{-2} + s_2 x^{-3} + \dots$$

$$\frac{f'(x)}{f(x)} = -\sigma_1 - \sigma_2 x - \sigma_3 x^2 - \dots$$

Entwickelt man $\frac{f'(p+h)}{f(p+h)}$ nach Potenzen von h , so liefert der Quotient der Koeffizienten von $h^{\lambda-1}$ und h^λ einen Näherungswert für den absolut kleinsten Wert von h , der der Gleichung $f(p+h)=0$ genügt, und $p+h$ stellt die Wurzel der Gleichung $f(x)=0$ dar, die dem Wert p am nächsten kommt.

Dem Bernoulli'schen Verfahren liegt ein allgemeiner Satz zu Grunde, der so ausgesprochen werden kann: Es sei $\varphi(x)$ eine Funktion einer komplexen Veränderlichen [II B 1 a], die sich in der Nähe von $x=p$

34) D. Bernoulli, Petrop. Comm. 3, 1728 [32], p. 92. Euler, Introd. 1, Laus. 1748, cap. 17, deutsch v. A. C. Michelson, Berl. 1788, F. Maser, Berl. 1885.

regulär verhält. Es werde die Funktion nun nach Potenzen von x — entwickelt

$$\varphi(x) = c_0 + c_1(x - p) + c_2(x - p)^2 + \dots$$

Auf der Peripherie des Konvergenzkreises muss mindestens eine singuläre Stelle liegen. Giebt es nun auf dem Kreise *nur* eine singuläre Stelle a und ist diese *ausserwesentlich* singulär, so ist für hin-

reichend grosse Werte von λ der Quotient $\frac{c_{2-1}}{c_2}$ sehr wenig von a —

verschieden³⁵⁾. Die Bernoulli'sche Methode ist eine spezielle Anwendung dieses Satzes; denn die Wurzeln der Gleichung $f(x) = 0$ sind

ausserwesentlich singuläre Stellen der Funktion $\frac{f'(x)}{f(x)}$. Man sieht

dass man die Wurzeln aber auch erhalten würde, wenn man statt $f'(x)$ irgend eine andere ganze Funktion, die für die Wurzeln von $f(x)$ nicht oder nicht von gleich hoher Ordnung wie $f(x)$ verschwindet durch $f(x)$ dividierte³⁶⁾.

14. Graeffe's Verfahren. Die Bernoulli'sche Methode wird wohl kaum eine praktische Bedeutung erlangen, weil die Konvergenz nur dann beträchtlich ist, wenn die zu berechnende Wurzel dem Werte wesentlich näher ist als die übrigen Wurzeln; dann lässt sich die Berechnung aber im allgemeinen besser mit der Newton'schen Methode machen. Dagegen hat Graeffe³⁷⁾ ein Verfahren angegeben, das auf einem ähnlichen Gedanken beruhend, wesentlich schneller zur Ermittlung *aller* Wurzeln einer ganzen rationalen Funktion führt, ohne die Separation der Wurzeln vorauszusetzen.

Es werde die ganze Funktion n^{ten} Grades $f(x)$ in der Form geschrieben:

$$f(x) = a_0 x^n - a_1 x^{n-1} + a_2 x^{n-2} - \dots \pm a_n.$$

Das Produkt $f(x)f(-x)$ wird nur gerade Potenzen von x enthalten, da es beim Verändern von x in $-x$ sich nicht ändert. Es kann als ganze Funktion n^{ten} Grades von x^2 dargestellt werden:

$$f(x)f(-x) = A_0 x^{2n} - A_1 x^{2n-2} + A_2 x^{2n-4} - \dots \pm A_n.$$

35) J. König, Math. Ann. 23 (1884), p. 447.

36) Die Bernoulli'sche Methode ist auch zu Reihenentwicklungen für die Wurzeln verwendet worden. Siehe E. Schroeder, Math. Ann. 2 (1870), p. 31; C. Runge, Acta Math. 6 (1885), p. 305; W. F. Meyer, Math. Ann. 33 (1889), p. 51; F. Cohn, Math. Ann. 44 (1894), p. 473.

37) C. H. Graeffe, Die Auflösung der höheren numerischen Gleichungen. Zürich 1837. Vergl. dazu J. F. Encke, Journ. f. Math. 22 (1841), p. 1; E. Carvallo, méthode pratique pour la résol. num. complète des équations algébriques ou transcendentes, Thèse, Paris 1890.

Die Koeffizienten A_0, A_1, A_2, \dots sind die Summen der Kolonnen in dem Schema:

$+ a_0^2$	$- 2a_0 a_2$ $+ a_1^2$	$+ 2a_0 a_4$ $- 2a_1 a_3$ $+ a_2^2$	$- 2a_0 a_6$ $+ 2a_1 a_5$ $- 2a_2 a_4$ a_3^2	\dots \dots \dots \dots
A_0	A_1	A_2	A_3	\dots

Die Wurzeln der Gleichung $A_0 z^n - A_1 z^{n-1} + A_2 z^{n-2} - \dots \pm A_n = 0$ sind die Quadrate der Wurzeln der ersten Gleichung $f(x) = 0$. Wenn man nun mit der neuen Gleichung ebenso verfährt u. s. f., so erhält man die Gleichungen, deren Wurzeln die 4^{ten}, 8^{ten}, 16^{ten} etc. Potenzen der Wurzeln der ersten Gleichung sind. Es sei $B_0 u^n - B_1 u^{n-1} + \dots \pm B_n = 0$ die Gleichung, der die 2^r ten Potenzen genügen. Dann ist, wenn $2^r = \lambda$ geschrieben wird:

$$\frac{B_1}{B_0} = \sum x_\alpha^\lambda, \quad \frac{B_2}{B_0} = \sum x_\alpha^\lambda x_\beta^\lambda, \quad \frac{B_3}{B_0} = \sum x_\alpha^\lambda x_\beta^\lambda x_\gamma^\lambda, \text{ etc.}$$

Nun sei $|x_1| > |x_2| > |x_3| > \dots > |x_n|$. Dann kommen für grosse Werte von λ gegen x_1^λ alle übrigen Grössen x_α^λ nicht in Betracht, gegen $x_1^\lambda x_2^\lambda$ kommen alle übrigen $x_\alpha^\lambda x_\beta^\lambda$ nicht in Betracht, gegen $x_1^\lambda x_2^\lambda x_3^\lambda$ alle übrigen $x_\alpha^\lambda x_\beta^\lambda x_\gamma^\lambda$ u. s. f. Es wird demnach bis auf einen kleinen Bruchteil seines Betrages $x_1^\lambda = \frac{B_1}{B_0}$ und ebenso $x_1^\lambda x_2^\lambda = \frac{B_2}{B_0}$, $x_1^\lambda x_2^\lambda x_3^\lambda = \frac{B_3}{B_0}$ u. s. f. Mithin bis auf einen kleinen Bruchteil seines Betrages $x_1^\lambda = \frac{B_1}{B_0}$, $x_2^\lambda = \frac{B_2}{B_1}$, $x_3^\lambda = \frac{B_3}{B_2}$ u. s. f., und die Wurzeln selbst sind λ te Wurzeln aus den Quotienten $\frac{B_1}{B_0}, \frac{B_2}{B_1}, \frac{B_3}{B_2}$ u. s. f. Sind die Wurzeln reell, so können sie dadurch bis auf ihr Vorzeichen berechnet werden. Das Vorzeichen ergibt sich dann daraus, dass für den mit dem richtigen Zeichen genommenen Wert $f(x)$ sehr klein werden muss. Der Wert von $f(x)$ giebt dann zugleich mit der Kenntnis eines genäherten Wertes von $f'(x)$ das Mass der erlangten Genauigkeit. Die Genauigkeit kann dann durch das Newton'sche Verfahren rasch gesteigert werden.

Es ist zweckmässig, die Erörterung etwas allgemeiner zu machen. Es werde nur vorausgesetzt, dass $x_1 x_2 \dots x_p$ absolut grösser sind als $x_{p+1} x_{p+2} \dots x_n$, während

$$|x_1| \geq |x_2| \geq \dots \geq |x_p| \quad \text{und} \quad |x_{p+1}| \geq |x_{p+2}| \geq \dots \geq |x_n|.$$

Die 2^{ten} Potenzen von $x_1, x_2 \dots x_n$ sollen der Kürze wegen mit $b_1 b_2 \dots b_n$ bezeichnet werden, und wir wollen r so gross annehmen, dass b_{p+1} sehr klein gegen b_p ist. Dann sind $b_1 b_2 \dots b_p$ nur um sehr kleine Bruchteile ihrer Beträge von den Wurzeln der Gleichung $B_0 u^p - B_1 u^{p-1} + B_2 u^{p-2} - \dots \pm B_p = 0$ und $b_{p+1} \dots b_n$ sind um sehr kleine Bruchteile ihrer Beträge von den Wurzeln der Gleichung $B_p u^{n-p} - B_{p+1} u^{n-p-1} + \dots \pm B_n = 0$ verschieden. Denn es ist, wenn $\beta_1 \beta_2 \dots \beta_n$ die absoluten Beträge von $b_1 \dots b_n$ bezeichnen, $B_0 u^p - B_1 u^{p-1} + B_2 u^{p-2} - \dots \pm B_p$ bis auf einen sehr kleinen Bruchteil von $B_0 \beta_p (|u| + \beta_1) (|u| + \beta_2) \dots (|u| + \beta_{p-1})$ gleich $B_0 (u - b_1) (u - b_2) \dots (u - b_p)$. Läge nun u z. B. dem Werte b_2 am nächsten und wäre nicht nur um einen sehr kleinen Bruchteil von b_2 verschieden, so wäre $u - b_1$ absolut genommen ein beträchtlicher Bruchteil von β_1 und $u - b_2 \dots u - b_p$ wären beträchtliche Bruchteile von β_2 . Dann könnte $B_0 (u - b_1) (u - b_2) \dots (u - b_p)$ sich nicht gegen einen sehr kleinen Bruchteil von $B_0 \beta_p (|u| + \beta_1) (|u| + \beta_2) \dots (|u| + \beta_{p-1})$ wegheben, d. h. u könnte keine Wurzel der Gleichung $B_0 u^p - B_1 u^{p-1} + \dots \pm B_p = 0$ sein. Ferner ist bis auf einen sehr kleinen Bruchteil von $b_1 b_2 \dots b_p$ die Grösse $B_p = b_1 \dots b_p$, $B_{p+1} = b_1 b_2 \dots b_p (b_{p+1} + \dots + b_n)$,

$$B_{p+2} = b_1 b_2 \dots b_p (b_{p+1} b_{p+2} + b_{p+2} b_{p+3} + \dots + b_{n-1} b_n) \text{ etc.}$$

und mithin bis auf sehr kleine Beträge $\frac{B_{p+1}}{B_p} = b_{p+1} + \dots + b_n$

$\frac{B_{p+2}}{B_p}$ gleich der Summe der Produkte von je zweien der Grössen $b_{p+1} b_{p+2} \dots b_n$ u. s. f. und daher die Wurzeln der Gleichung $B_p u^{n-p} - B_{p+1} u^{n-p-1} + \dots \pm B_n = 0$ bis auf kleine Beträge gleich $b_{p+1} \dots b_n$.

Sobald also b_p gross gegen b_{p+1} ist, so zerfällt die Gleichung $B_0 u^n - B_1 u^{n-1} + \dots \pm B_n = 0$ in zwei Gleichungen. Die Wurzeln $b_{p+1} \dots b_n$ werden im Vergleich zu $b_1 \dots b_p$ Null gesetzt, das giebt

$$B_0 u^n - B_1 u^{n-1} + \dots \pm B_p u^{n-p} = 0$$

und die Wurzeln $b_1 \dots b_p$ werden im Vergleich zu $b_{p+1} \dots b_n$ unendlich gesetzt; das giebt:

$$B_p u^{n-p} - B_{p+1} u^{n-p-1} + \dots \pm B_n = 0.$$

Beim praktischen Rechnen merkt man von selbst diesen Zerfall daran, dass die Koeffizienten der einen Gleichung aufhören, die der andern, so weit man ihre Beträge berechnet, zu beeinflussen, und dass B_p bei jedem Schritt nur zum Quadrat erhoben wird. Die Rechnung verläuft gerade so, als ob man es mit zwei getrennten Gleichungen

zu thun hätte. Diese Gleichungen zerfallen von neuem, wenn wieder unter ihren Wurzeln die einen sehr klein gegen die andern werden. Schliesslich sind nur noch lineare Gleichungen übrig, es sei denn, dass gleiche Wurzeln oder gleiche absolute Beträge der Wurzeln vorkommen. Für ein Paar konjugierter Wurzeln z. B. wird im allgemeinen eine Gleichung zweiten Grades sich ergeben, der die $2^{r^{\text{ten}}}$ Potenzen der beiden Wurzeln genügen. Hieraus können die $2^{r^{\text{ten}}}$ Potenzen gefunden werden. Die Wurzeln selbst können aber nicht unmittelbar hieraus berechnet werden, weil die $2^{r^{\text{te}}}$ Wurzel im Gebiete der komplexen Zahlen 2^r verschiedene Werte hat. Nur der absolute Betrag kann sogleich gefunden werden. Man kann nun zwar die Wurzeln eindeutig auf folgende Weise finden. Wenn man in $f(x)$ die geraden und ungeraden Potenzen von einander trennt, so kann man schreiben $f(x) = \varphi(x^2) + x\psi(x^2) = 0$, wo $\varphi(x^2)$ und $\psi(x^2)$ ganze Funktionen von x^2 sind. Ist nun der Wert von x^2 gefunden, so muss $x = -\frac{\varphi(x^2)}{\psi(x^2)}$ sein³⁸⁾. Ebenso folgt, dass aus dem Wert von x^4 der Wert von x^2 , aus x^8 der von x^4 u. s. f. eindeutig berechnet werden kann. Aber diese Art der Berechnung von x aus x^{2^r} würde bei beträchtlichen Werten von r beschwerlich werden. Wenn nur ein Paar konjugierter Wurzeln vorhanden sind, während alle übrigen Wurzeln reelle Werte haben, so liefert, wenn diese bestimmt sind, die Summe

$$x_1 + x_2 + \cdots + x_n = \frac{a_0}{a_1}$$

den doppelten reellen Teil der konjugierten Wurzeln, der dann mit dem absoluten Betrage zusammen die Wurzeln bestimmt. Sind zwei Paare konjugierter Wurzeln vorhanden, so liefert die Summe der Wurzeln eine lineare Gleichung zwischen den reellen Teilen der Wurzelpaare. Aber die Summe der reziproken Werte der Wurzeln, die gleich $\frac{a_{n-1}}{a_n}$ ist, liefert eine zweite lineare Gleichung, da die absoluten Beträge ja bekannt sind.

Sind mehrere Paare konjugierter Wurzeln vorhanden, so kann man die Werte dadurch finden, dass man für irgend einen Wert p $f(p+h)$ nach Potenzen von h entwickelt und das Verfahren auch auf die Gleichung in h anwendet. Für die Paare konjugierter Wurzeln erhält man dann ihren Abstand vom Punkte $x = p$. Dann sind die Wurzeln als Durchschnittspunkte von Kreisen bestimmt. Oder man

38) E. Carvallo, l. c.

kann den folgenden von *Encke*³⁹⁾ vorgeschlagenen Weg betreten. Es sei der Grad n der Gleichung gerade vorausgesetzt. Wäre n nicht gerade, so kann man es gerade machen, indem man die Gleichung mit x multipliziert. Wir schreiben $n = 2m$ und bringen durch Division mit x^m die Gleichung auf die Form:

$$a_0 x^m - a_1 x^{m-1} + \dots + a_{2m} x^{-m} = 0.$$

Indem man nun $x = r e^{\varphi i}$ setzt und den reellen und imaginären Theil für sich der Null gleich macht, ergeben sich die beiden Gleichungen

$$\begin{aligned} (a_0 r^m + a_{2m} r^{-m}) \cos m\varphi - (a_1 r^{m-1} + a_{2m-1} r^{-m+1}) \cos (m-1)\varphi + \dots \\ + a_m = 0, \\ (a_0 r^m - a_{2m} r^{-m}) \sin m\varphi - (a_1 r^{m-1} - a_{2m-1} r^{-m+1}) \sin (m-1)\varphi + \dots \\ + (a_{m-1} r - a_{m+1} r^{-1}) \sin \varphi = 0. \end{aligned}$$

Setzt man $\cos \varphi = t$, so lassen sich $\cos 2\varphi, \cos 3\varphi, \dots$ als ganze Funktionen von t darstellen. So erlaßt man, wenn die zweite Gleichung durch $\sin \varphi$ dividiert wird, zwei Gleichungen für t , und durch das Verfahren des gemeinsamen Theilers wird dann t rational aus den Koeffizienten der Gleichungen bestimmt.

Was sonst zu bemerken ist, knüpft sich am besten an die Ausführung eines Beispiels an:

$$3.22x^6 + 4.12x^4 + 3.11x^3 - 7.25x^2 + 1.88x - 7.84 = 0.$$

Es sind nun mit der Rechenmaschine [I F] die Koeffizienten der Gleichungen gebildet, denen die 2, 4, 8, 32, 64, 128^{ten} Potenzen der Wurzeln genügen⁴⁰⁾. Dabei werden nur die Koeffizienten selbst zu Papier gebracht, nicht die Glieder, aus denen sie bestehen. Die Maschine liefert die Summen der Quadrate und Produkte, ohne dass man einzelnen Quadrate oder Produkte hinschreiben braucht. So findet man z. B. die Grössen $A_0, A_1 \dots A_7$

$$\begin{array}{cccccc} 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ + 1.0368, & - 2.6533, & - 2.9716, & + 1.1990, & - 2.3733, & - 1.10 \\ & & & 1 & & \\ & & & + 6.1466. & & \end{array}$$

Die darüber geschriebenen Zahlen geben die Potenz von 10 an, der man sich die Werte multipliziert denken muss. Das ist bei

39) *J. F. Encke*, Journ. f. Math. 22 (1841), p. 193.

40) Bei logarithmischer Rechnung wird man Tabellen der Addition logarithmen benutzen und die Numeri werden überhaupt nicht aufgeschlagen. Über Additionslogarithmen für komplexe Grössen vgl. einen Vorschlag *R. Mehmkke*, Zeitschr. f. Math. u. Phys. 40 (1895), p. 15.

sehr grossen Zahlen, mit denen man es alsbald zu thun hat, eine notwendige Bezeichnung. Die Koeffizienten der Gleichung, der die Wurzelquadrate genügen, sind $A_0, -A_1, A_2, -A_3, A_4, -A_5, A_6$. Eine Zeichenfolge in der Reihe A_0 bis A_6 ist also ein Zeichenwechsel in der Reihe der Koeffizienten. Durch Descartes' Zeichenregel schliesst man daher aus den beiden Zeichenfolgen, dass die Gleichung der Wurzelquadrate nicht mehr als zwei positive Wurzeln, die erste Gleichung mithin nicht mehr als zwei reelle Wurzeln hat. Für die Gleichung der 128^{ten} Potenzen findet man die Grössen $B_0 B_1 \dots B_6$ gleich:

$$\begin{array}{cccccc} 65 & 82 & 101 & 117 & 120 & 117 & 114 \\ 1.013 & + 3.051 & + 2.081 & + 1.125 & + 8.179 & - 2.912 & + 2.968 \end{array}$$

Hier haben sich nun die Wurzeln, deren absolute Beträge verschieden sind, schon von einander getrennt. Der 1^{te}, 3^{te}, 4^{te}, 5^{te}, 7^{te} Koeffizient werden beim nächsten Schritt beinahe gleich den Quadraten der hingeschriebenen Zahlen. Nur der 3^{te} Koeffizient erfährt in den ersten 4 Ziffern noch eine kleine Änderung, weshalb es noch lohnt, für den ersten und dritten Koeffizienten allein einen Schritt weiter zu gehen,

$$\begin{array}{cc} 30 & 202 \\ 1.026, - & 4.324. \end{array}$$

Der 3^{te}, 4^{te} und 5^{te} Koeffizient bestimmen die 128^{ten} Potenzen der beiden reellen Wurzeln. Der 1^{te} und 3^{te} bestimmen den absoluten Betrag des einen konjugierten Paares, der 5^{te} und 7^{te} den des andern:

$$\begin{aligned} \sqrt[5]{\frac{4.324}{1.026} \cdot 10^{72}} &= 1.38626, & \frac{\sqrt[125]{1.125 \cdot 10^{117}}}{\sqrt[25]{4.324 \cdot 10^{202}}} &= 1.32714, \\ \sqrt[125]{\frac{8.179}{1.125} 10^3} &= 1.07193, & \sqrt[25]{\frac{2.968}{8.179} 10^{-6}} &= 0.94372. \end{aligned}$$

Die Substitution der Werte zeigt, dass die beiden reellen Wurzeln -1.32714 und $+1.07193$ sind. Die Summe der Wurzeln und die Summe der reziproken Werte liefern für die reellen Teile u_1, u_2 der beiden komplexen Paare die beiden Gleichungen

$$\begin{aligned} 2u_1 + 2u_2 &= 0.25521, \\ \frac{2u_1}{r_1^2} + \frac{2u_2}{r_2^2} &= 0.06040, \end{aligned}$$

aus denen $u_1 = +0.18769$, $u_2 = -0.06009$ gefunden werden. Aus u_1, u_2 und den bekannten absoluten Beträgen werden nun die imaginären Teile $v_1 = \sqrt{r_1^2 - u_1^2}$, $v_2 = \sqrt{r_2^2 - u_2^2}$ berechnet. So ergeben sich die beiden konjugierten Paare

$$0.18769 \pm 1.37350i, \quad -0.06009 \pm 0.94181i.$$

Die Substitution der Wurzeln und die Berechnung der Ableitung

(oder des Differenzenproduktes) zeigt, dass die Wurzeln bis auf etwa eine Einheit der 5^{ten} Dezimale richtig sind⁴¹⁾.

15. Die Approximation für den Fall mehrerer Veränderlichen.

Das Newton'sche Verfahren kann, wie schon in der Einleitung bemerkt wurde, auf die Bestimmung mehrerer Unbekannten, die mehreren Gleichungen genügen, angewendet werden. Auch die Horner'sche Anordnung zur Berechnung der Koeffizienten lässt sich in dem Fall ganzer rationaler Funktionen der Veränderlichen verwerten⁴²⁾. Es möge hier noch über die Genauigkeit der Annäherung eine Bemerkung hinzugefügt werden.

Es seien zwei Gleichungen in der Form $x = \varphi(xy)$ und $y = \psi(xy)$ gegeben, und es seien die Funktionen φ und ψ nur langsam mit x und y veränderlich, so kann man ähnlich wie bei einer Veränderlichen successive Annäherungen finden, indem man rechts Näherungswerte für x und y einsetzt und damit neue Näherungswerte berechnet. Bedeuten a und b Näherungswerte von x und y und sind a_1 und b_1 die nächsten daraus berechneten Näherungswerte, so ist

$$x - a_1 = \varphi(xy) - \varphi(ab) = \varphi_1(x - a) + \varphi_2(y - b),$$

$$y - b_1 = \psi(xy) - \psi(ab) = \psi_1(x - a) + \psi_2(y - b),$$

wo wir uns in den partiellen Ableitungen $\varphi_1, \varphi_2, \psi_1, \psi_2$ Werte der Veränderlichen zu denken haben, die zwischen den Näherungswerten und den wahren Werten liegen. Daraus folgt

$$|x - a_1| \leq |\varphi_1| \cdot |x - a| + |\varphi_2| \cdot |y - b|,$$

$$|y - b_1| \leq |\psi_1| \cdot |x - a| + |\psi_2| \cdot |y - b|,$$

und durch Addition

$$|x - a_1| + |y - b_1| \leq (|\varphi_1| + |\psi_1|) \cdot |x - a| + (|\varphi_2| + |\psi_2|) \cdot |y - b|.$$

41) Das *Graeffe'sche* Verfahren ist im allgemeinen wohl das schnellste, wenn alle Wurzeln berechnet werden sollen. Für besondere Formen von Gleichungen sind besondere Methoden der numerischen Auflösung entwickelt worden. Die Gleichungen 3^{ten} Grades führt man auf die Gleichung zwischen $\cos \varphi$ und $\cos 3\varphi$ zurück oder auf die Gleichung zwischen dem hyperbolischen Cosinus oder Sinus von φ und 3φ . Für die trinomischen Gleichungen hat *K. F. Gauss*, Gött. Abh. 1850 = Werke 3, p. 85 ein Verfahren angegeben. Vergl. ferner *S. Gundelfinger*, Tafeln zur Ber. der reellen W. sämtl. trinomischer Gl. Leipzig (1896); die reellen Wurzeln viergliedriger Gl. behandelt *A. Wiener*, Zeitschr. f. Math. Phys. 31 (1886), p. 65, 192.

42) *H. Scheffler*, Auflösung der alg. Gleich. Braunsch. 1859. *W. Wagner*, Best. der Genauigkeit des Newton'schen Verfahrens. Berlin 1860. *R. Mehmke*, Zeitschr. f. Math. Phys. 35 (1890), p. 174.

Sind nun $|\varphi_1| + |\psi_1|$ und $|\varphi_2| + |\psi_2|$ nicht grösser als ein echter Bruch m , so ist

$$|x - a_1| + |y - b_1| \leq m(|x - a| + |y - b|),$$

und folglich wird man dem gesuchten Wertsystem xy bei fortgesetzter Rechnung beliebig nahe kommen.

Beim Newton'schen Verfahren nimmt man, für $f(xy)=0$, $g(xy)=0$, die Verbesserungen h , k eines Systems von Näherungswerten a , b so, dass

$$\begin{aligned} f(ab) + f_1(ab)h + f_2(ab)k &= 0, \\ g(ab) + g_1(ab)h + g_2(ab)k &= 0. \end{aligned}$$

Das heisst, man setzt

$$h = \frac{gf_2 - fg_2}{f_1g_2 - g_1f_2}, \quad k = \frac{fg_1 - gf_1}{f_1g_2 - g_1f_2}.$$

Man kann diese Rechnung als speziellen Fall der eben betrachteten Rechnung auffassen, wenn man in den Gleichungen $x = \varphi(x, y)$ und $y = \psi(x, y)$ die rechten Seiten so definiert:

$$\begin{aligned} \varphi(xy) &= x + \frac{g(xy)f_2(xy) - f(xy)g_2(xy)}{f_1(xy)g_2(xy) - g_1(xy)f_2(xy)}, \\ \psi(xy) &= y + \frac{f(xy)g_1(xy) - g(xy)f_1(xy)}{f_1(xy)g_2(xy) - g_1(xy)f_2(xy)}. \end{aligned}$$

Man erhält dann, indem man \mathcal{A} für die Funktionaldeterminante $f_1g_2 - g_1f_2$ schreibt:

$$\varphi_1 = \frac{gf_{21} - fg_{21}}{\mathcal{A}} - \frac{gf_2 - fg_2}{\mathcal{A}^2} \frac{\partial \mathcal{A}}{\partial x} = Af + Bg,$$

wo A und B Brüche sind, deren Nenner \mathcal{A}^2 und deren Zähler aus den ersten und zweiten Ableitungen von f und g nur durch Addition, Subtraktion und Multiplikation gebildet sind. Ähnliche Ausdrücke ergeben sich für φ_2 , ψ_1 , ψ_2 . Ist für alle in Betracht kommenden Werte von x und y die Funktionaldeterminante dem absoluten Betrage nach grösser als eine von Null verschiedene Zahl und sind zugleich alle ersten und zweiten Ableitungen von f und g absolut genommen nicht grösser als eine feste Zahl, so sind offenbar A und B absolut genommen nicht grösser als eine feste Zahl. $\varphi_1(ab)$ wird daher mindestens von derselben Ordnung klein wie $f(ab)$ und $g(ab)$, d. h. von der Ordnung $\varrho = |x - a| + |y - b|$. Daher ist auch m von der Ordnung ϱ und es lässt sich eine Zahl M finden der Art, dass $m < M \cdot \varrho$. Wird nun $|x - a_1| + |y - b_1|$ mit ϱ_1 bezeichnet, so ist, wie oben gezeigt, $\varrho_1 < M\varrho^2$ oder $M\varrho_1 < (M\varrho)^2$. Daraus folgt, dass nach n Schritten $M\varrho_n < (M\varrho)^{2^n}$ ist. Wenn $M\varrho$ ein echter Bruch ist, ergibt sich daher eine rasche Konvergenz.

Bei der praktischen Berechnung wird man im allgemeinen sich des Beweises der Konvergenz entschlagen. Man wird eben darauf los rechnen und dann das Resultat dadurch verifizieren, dass man die Werte in f und g einsetzt und zusieht, wie klein f und g dadurch werden. Da

$$h = \frac{gf_2 - fg_2}{\Delta}, \quad k = \frac{fg_1 - gf_1}{\Delta}$$

die wirklichen Abweichungen liefern, wenn rechts in $f_1 f_2 g_1 g_2 \Delta$ gewisse zwischen den Näherungswerten und den wahren Werten liegende Zahlen eingesetzt werden, so kann man durch die Kenntnis oberer Grenzen von $|f_1|$, $|f_2|$, $|g_1|$, $|g_2|$ und einer unteren Grenze von $|\Delta|$ aus den Werten von f und g obere Grenzen für $|h|$ und $|k|$ ermitteln.

Auf mehrere Gleichungen mit mehreren Veränderlichen lassen sich dieselben Betrachtungen ohne weiteres übertragen. Lineare Gleichungen auf diese Weise durch successive Annäherungen zu lösen, ist zuerst von *Seidel* ⁴³⁾ für den Fall einer grossen Zahl von Unbekannten vorgeschlagen worden. Seidel's Verfahren kann als spezieller Fall des hier erörterten aufgefasst werden, wenn man die linearen Gleichungen $\sum a_{ik} x_i = c_k$ in der Form schreibt:

$$x_k = \frac{1}{a_{kk}} (c_k - \sum' a_{ik} x_i). \quad (44)$$

43) *Ph. L. Seidel*, Münchener Akad. Abhandl. 11 (1874), p. 81.

44) *R. Mehnke* u. *P. A. Nekrassof*, Mosk. Math. Samml. 16 (1892) haben die Konvergenz des Seidel'schen Verfahrens und seiner Modifikationen untersucht.

IB3b. RATIONALE FUNKTIONEN DER WURZELN; SYMMETRISCHE UND AFFEKTFUNCTIONEN.

VON

K. TH. VAHLEN.

Inhaltsübersicht.

1. Symmetrische Funktionen einer Größenreihe; Definition, Hauptsatz, Bezeichnung; Anzahlen.
 2. Formeln und Verfahren von *Cramer*, *Newton*, *Girard*, *Waring*, *Faà di Bruno*.
 3. Reduktion einer Funktion nach *Waring* und *Gauss*, nach *Cauchy* und *Kronecker*.
 4. Das *Cauchy'sche* Verfahren und seine Verallgemeinerung durch *Transon*.
 5. Erzeugende Funktionen von *Borchardt* und *Kronecker*.
 6. Fundamentalsysteme: *Borchardt* u. A.
 7. Sätze über Grad und Gewicht; Klassifikationen.
 8. Partielle Differentialgleichungen und Differentialoperatoren.
 9. Tabellen; tabellarische Gesetze. Das *Cayley-Betti'sche* Symmetriegesetz und seine Verallgemeinerung durch *Mac Mahon*.
 10. *Mac Mahon's* neue Theorie der symmetrischen Funktionen.
 11. Beziehungen zur Zahlentheorie.
 12. Spezielle symmetrische Funktionen.
 13. Symmetrische Funktionen von Wurzeldifferenzen; Seminvarianten.
 14. Zweiwertige und alternierende Funktionen.
 15. Mehrwertige, Affektfunktionen. Gruppe.
 16. Allgemeine Sätze von *Lagrange*, *Galois*, *Jordan*.
 17. Mögliche Wertezahlen.
 18. Herstellung von Affektfunktionen, *Kirkman's* Problem.
 19. Aufzählungen.
 20. Rationalwerden von Affektfunktionen; Affekt einer Gleichung.
 21. Cyklische, cykloïdische, metacyklische Funktionen.
 22. Durch Wurzeln auflösbare Gleichungen. Durch Quadratwurzeln auflösbare Gleichungen.
 23. Gleichungen 7^{ten} Grades, deren 30wertige Affektfunktionen rational sind.
 24. Funktionen von mehreren Variabelnreihen, Wurzeln von Gleichungssystemen. Berechnung symmetrischer Funktionen nach *Poisson*, v. *Escherich*.
 25. Symmetrische Funktionen von Reihen von Variabeln, die von einander unabhängig sind. Sätze, Formeln, Verfahren von *Mertens*, *Waring*, *Schläfli*, *Mac Mahon*, *Junker*.
 26. Relationen zwischen den elementar-symmetrischen Funktionen: *Brill* und *Junker*.
 27. Allgemeinere Funktionen: *Junker*, *Muir*.
- Litteratur s. IB 1a.
-

1. Symmetrische Funktionen einer Grössenreihe; Definition, Hauptsatz, Bezeichnung; Anzahlen. Eine rationale Funktion der n von einander unabhängigen Grössen x_1, x_2, \dots, x_n , welche bei einer beliebigen Vertauschung dieser Grössen ihre Form, also auch ihren Wert nicht ändert, heisst eine „symmetrische“ oder „einwertige“ Funktion von x_1, x_2, \dots, x_n . Insbesondere heissen die Funktionen

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = -a_1, \quad x_1 x_2 + x_1 x_3 + \dots + x_{n-1} x_n = a_2, \dots, \\ x_1 x_2 \dots x_n = (-1)^n a_n$$

die „elementaren“ symmetrischen Funktionen.

Die Gleichung

$$f(x) = x^n + a_1 x^{n-1} + a_2 x^{n-2} + \dots + a_n = 0$$

hat die n Wurzeln x_1, x_2, \dots, x_n .

Jede symmetrische Funktion ist Quotient zweier ganzen symmetrischen Funktionen²⁾.

Jede ganze symmetrische Funktion ist eine ganze Funktion von den elementaren symmetrischen Funktionen.

Um diesen Hauptsatz gruppiert sich die ganze Theorie.

Jede ganze symmetrische Funktion zerfällt in ein Aggregat von „Typen“, d. h. solcher Funktionen, welche aus einem Gliede $x_1^{i_1} x_2^{i_2} \dots x_n^{i_n}$ durch Summation aller durch Vertauschung der Exponenten daraus hervorgehenden verschiedenen Glieder entstehen. Eine solche typische oder eintypige (*Netto*) Funktion wird mit $(i_1 i_2 i_3 \dots)$ bezeichnet³⁾, und zur Abkürzung z. B. $(i_1 i_1 i_1 i_2 i_2 i_3) = (i_1^3 i_2^2 i_3)$ gesetzt⁴⁾.

Die Anzahlen aller möglichen typischen symmetrischen Funktionen bis zur Exponentensumme $\sum i = 30$ hat *Forsyth*⁵⁾ berechnet.

2. Formeln und Verfahren von Cramer, Newton, Girard, Waring, Faà di Bruno. Das Produkt zweier typischen symmetrischen Funktionen zerfällt in eine Summe solcher; hierdurch kann man Typen höherer Ordnung als ganze Funktionen von Typen niedrigerer Ordnungen, schliesslich durch die Typen der niedrigsten Ordnungen in jeder Wurzel: $(1), (1^2), (1^3), \dots$ d. h. durch die elementaren symmetrischen Funktionen darstellen³⁾.

1) *Alb. Girard*, Invention nouvelle en l'algebre, Amsterdam 1629.

2) *A. Th. Vandermonde*, Paris Mém. de l'ac. d. sc. 1771; *Ch. Biehler*, Nouv. ann. d. math. (3) 3, 1884, p. 218 ff.; *Éd. Amigues*, Nouv. ann. (3) 14, 1895, p. 494 ff.

3) *G. Cramer*, Introduction à l'analyse des lignes courbes algébriques. Genf 1750.

4) *Meier Hirsch*, Aufgabensammlung zur Buchstabenrechnung und Algebra. Berlin 1809.

5) *A. R. Forsyth*, Messenger of math. (2) 10, 1881, p. 44.

Die symmetrische Funktion $(i_1 i_2 \dots i_r)$ heisst „ ν -förmig“. Die einförmige Funktion (i) heisst die i^{te} Potenzsumme und wird mit s_i bezeichnet. Man drückt die Potenzsummen durch die elementaren symmetrischen Funktionen aus vermöge der „Newton'schen Formeln“:

$$\begin{aligned} s_1 + a_1 &= 0 \\ s_2 + a_1 s_1 + 2a_2 &= 0 \\ s_3 + a_1 s_2 + a_2 s_1 + 3a_3 &= 0 \\ &\vdots \\ s_n + a_1 s_{n-1} + a_2 s_{n-2} + \dots + na_n &= 0 \\ s_{n+1} + a_1 s_n + a_2 s_{n-1} + \dots + s_1 a_n &= 0^6) \\ &\vdots \end{aligned}$$

oder explicite durch die „Girard'sche Formel“:

$$s_i = i \sum_{\sum_{x=1}^n x \lambda_x = i} (-1)^{\sum_{x=1}^n \lambda_x} \frac{\left(\sum_{x=1}^n \lambda_x - 1 \right)!}{\prod_{x=1}^n \lambda_x!} \prod_{x=1}^n a_x^{\lambda_x}; ^7)$$

umgekehrt ist:

$$a_i = \sum (-1)^{\sum_{x=1}^n \lambda_x} \prod_{x=1}^n \frac{\left(\frac{s_x}{\lambda_x} \right)^{\lambda_x}}{\lambda_x!}.$$

Die mehrförmigen Funktionen werden auf die einförmigen zurückgeführt durch die „Waring'schen Formeln“⁸⁾:

$$\begin{aligned} (i_1 i_2) &= (i_1)(i_2) - (i_1 + i_2) \\ (i_1 i_2 i_3) &= (i_1)(i_2)(i_3) - (i_1)(i_2 + i_3) - (i_2)(i_1 + i_3) - (i_3)(i_1 + i_2) + 2(i_1 + i_2 + i_3), \\ &\text{u. s. w.} \end{aligned}$$

welche *Faà di Bruno* in die symbolische Determinante zusammenfasst:

6) Girard l. c.; I. Newton, *Arithmetica universalis*, edit. s'Gravesande, p. 192; vgl. ferner: J. Petersen, *Tidsskr. f. Math.* (3) 6, 1876, p. 9; J. Farkas, *Archiv f. Math. u. Phys.* 65, 1880, p. 433; Adolph Steen, *Tidsskr. f. Math.* (5) 3, 1885, p. 30; V. Janni, *Gi. di mat.* 23, 1885, p. 34; M. d'Ocagne, *Journ. de sc. math. astr.* 7, 1885, p. 133; L. Schendel, *Zeitschr. f. M. u. Ph.* 31, 1886, p. 316; J. Duran Loriga, *Progreso mat.* 2, 1892, p. 221; C. Tweedie, *Edinb. Math. Soc. Proc.*, 1893, p. 61.

7) Girard l. c.; s. ferner Ed. Waring, *Miscellanea analytica de aequationibus algebraicis et curvarum proprietatibus*, Cambridge 1762, p. 1 u. *Meditationes algebraicae*, Cambr. 1782, p. 1; Claude Pellet, *Nouv. Ann.* (2) 14, 1875, p. 259; Schendel 6); F. Gomes Teixeira, *Nouv. ann.* (3) 7, 1888, p. 382 ff.; A. Cayley, *Mess. of Math.* (2) 21, 1892, p. 133 = *Coll. Pap.* 13, p. 213; Worontzoff, *Nouv. ann.* (3) 12, 1893, p. 116.

8) Waring, *Misc. anal.* p. 6 u. *Med. alg.* p. 8.

$$(i_1 i_2 i_3 \dots) = \begin{vmatrix} s_{i_1} & s^{i_2} & s^{i_3} & \dots \\ s^{i_1} & s_{i_2} & s^{i_3} & \dots \\ s^{i_1} & s^{i_2} & s_{i_3} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{vmatrix},$$

in welcher nach der Entwicklung die Exponenten von s in Indices zu verwandeln sind. Für je h gleiche Exponenten i ist die rechte Seite dieser Gleichungen durch $h!$ zu dividieren⁹⁾.

3. Reduktion einer Funktion nach Waring und Gauss, nach Cauchy und Kronecker. Ordnet man eine beliebige ganze symmetrische Funktion so, dass das Glied $c_{i_1 i_2 i_3 \dots} x_1^{i_1} x_2^{i_2} x_3^{i_3} \dots$ dem Gliede $c_{i_1' i_2' i_3' \dots} x_1^{i_1'} x_2^{i_2'} x_3^{i_3'} \dots$ vorausgeht, wenn die erste der nicht verschwindenden Differenzen der Reihe $i_1 - i_1', i_2 - i_2', i_3 - i_3', \dots$ positiv ausfällt, und ist dann $c_{i_1 i_2 i_3 \dots} x_1^{i_1} x_2^{i_2} x_3^{i_3} \dots$ das höchste Glied der gegebenen Funktion, so erhält man eine Funktion mit einem höchsten Gliede niedrigerer Ordnung, wenn man von der gegebenen Funktion das Glied

$$(-1)^{i_1 + i_2 + \dots} c_{i_1 i_2 i_3 \dots} a_1^{i_1 - i_2} a_2^{i_2 - i_3} a_3^{i_3 - i_4} \dots$$

subtrahiert. Durch Fortsetzung solcher Subtraktionen wird die gegebene Funktion schliesslich als ganze Funktion der elementar-symmetrischen Funktionen dargestellt. Dieses von *Waring* und *Gauss* angegebene Reduktionsverfahren lässt die Eindeutigkeit dieser Darstellung erkennen, sowie, dass in die Koeffizienten keine Brüche eingeführt werden¹⁰⁾.

Setzt man:

$$f_{h+1}(x) = (x - x_n)(x - x_{n-1}) \dots (x - x_{n-h}), \quad (h = 0, 1, \dots, n-2),$$

so sind die Koeffizienten in $f_{h+1}(x)$ ganze Funktionen von $x_n, x_{n-1}, \dots, x_{n-h}$. Eine beliebige ganze Funktion von x_1, x_2, \dots, x_n lässt sich jetzt successive vermittelst der Gleichungen:

$$f_{n-1}(x_1) = 0, \quad f_{n-2}(x_2) = 0, \quad f_{n-3}(x_3) = 0, \quad \dots, \quad f(x_n) = 0$$

reduzieren auf eine von x_1 freie, in x_2 lineare, in x_3 quadratische u. s. w. Funktion, also auf ein Aggregat von $n!$ Gliedern

9) *Faà di Bruno*, Einleitung in die Theorie der binären Formen, deutsch von Th. Walter, Leipzig 1881, p. 9; *M. Auric*, Nouv. ann. (3) 9, 1890, p. 561.

10) *Waring*, Meditationes algebraicae, ed. III, p. 13; *K. F. Gauss*, Demonstratio nova altera etc., Comment. Gotting. 3 (1816) 1815 = Werke 3, p. 31.

$$x_1^{i_1} x_2^{i_2} \dots x_n^{i_n}, \quad \begin{pmatrix} i_1 = 0 \\ i_2 = 0, 1 \\ i_3 = 0, 1, 2 \\ \vdots \\ i_n = 0, 1, 2, \dots, n-1 \end{pmatrix}$$

und eine ganze symmetrische Funktion wird dadurch auf ein von x_1, x_2, \dots, x_n freies Glied zurückgeführt¹¹⁾.

4. Das Cauchy'sche Verfahren und seine Verallgemeinerung durch Transon. Die Girard'sche wie die Newton'schen Formeln ergeben sich aus der Identität:

$$\frac{f'(x)}{f(x)} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{x-x_i} = \frac{s_0}{x} + \frac{s_1}{x^2} + \frac{s_2}{x^3} + \dots,$$

die man auch dahin ausdrücken kann, dass s_h der Koeffizient von $\frac{1}{x}$ in der Entwicklung von $\frac{f'(x)}{f(x)} x^h$ nach fallenden Potenzen von x ist. Bedeutet also $\varphi(x)$ eine beliebige ganze Funktion, so ergibt sich $\sum_{i=1}^n \varphi(x_i)$ als Entwicklungskoeffizient von $\frac{1}{x}$ in der Entwicklung von $\frac{f'(x)}{f(x)} \varphi(x)$ nach fallenden Potenzen von x .

Dieses von *Cauchy*¹²⁾ aus seiner Residuenrechnung gefolgerte Verfahren ist von *Transon*¹³⁾ verallgemeinert worden. Um den Wert von $\sum \varphi(x_i x_k)$ zu ermitteln, wo φ eine ganze Funktion ist und sich die Summation auf alle Wurzelpaare x_i, x_k ($i \geq k$) bezieht, nehme man den Koeffizienten $\psi(x_1)$ von $\frac{1}{x}$ in der Entwicklung von $\frac{\frac{d}{dx} \left(\frac{f(x)}{x-x_1} \right)}{\frac{f(x)}{x-x_1}} \varphi(x_1, x)$; dann ist $\sum \varphi(x_i x_k)$ der Koeffizient von $\frac{1}{x}$ in der Entwicklung von $\frac{f'(x)}{f(x)} \psi(x)$ u. s. w.

5. Erzeugende Funktionen von Borchardt und Kronecker. Wie sich aus der Entwicklung von

11) *A. Cauchy*, Exercices d. math. 4, Paris 1829, p. 103; *L. Kronecker*, Berl. Ber. 1873, p. 117 = Werke 1, p. 303; Grundzüge einer arithmetischen Theorie der algebraischen Grössen, Berlin 1882, p. 39 = Werke 2, p. 290; *F. Blutel*, Par. Soc. math. Bull. 20, 1892, p. 92.

12) *Cauchy*, Exercices d. math. 1, Par. 1826.

13) *Abel Transon*, Nouv. ann. 9, 1850, p. 75; *J. Dienger*, Arch. f. Math. u. Ph. 16, 1850, p. 471.

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{t - x_i} = \frac{f'(x)}{f(x)}$$

nach fallenden Potenzen von t durch Koeffizientenvergleichung die Werte der Potenzsummen als Funktionen der a_1, a_2, \dots, a_n ergeben, so ergeben sich aus der Entwicklung der Borchardt'schen erzeugenden Funktion:

$$\begin{aligned} & \sum \frac{1}{(t_1 - x_{i_1})(t_2 - x_{i_2}) \cdots (t_n - x_{i_n})} \\ &= (-1)^m \frac{f(t_1)f(t_2) \cdots f(t_m)}{\prod (t_i - t_k)} \frac{\partial}{\partial t_1} \frac{\partial}{\partial t_2} \cdots \frac{\partial}{\partial t_m} \left(\frac{\prod (t_i - t_k)}{f(t_1)f(t_2) \cdots f(t_m)} \right) \end{aligned}$$

die Werte aller m -förmigen Funktionen der x_1, \dots, x_n . Die Summation bezieht sich auf alle Möglichkeiten, die verschiedenen Indices i_1, i_2, \dots, i_m aus $1, 2, \dots, n$ auszuwählen, das Produkt $\prod (t_i - t_k)$ auf alle Werte $i, k = 1, 2, \dots, m$, für welche $i < k$ ist¹⁴⁾.

Eine andere erzeugende Funktion hat *Kronecker*¹⁵⁾ angegeben. Sind $-b_1, +b_2, -b_3, \dots, \pm b_m$ die elementaren symmetrischen Funktionen von y_1, y_2, \dots, y_m , so ist $\prod_{i,k} (1 - x_i y_k)$ gleich

$$\prod_k (1 + a_1 y_k + a_2 y_k^2 + \cdots + a_n y_k^n) = \prod_i (1 + b_1 x_i + b_2 x_i^2 + \cdots + b_m x_i^m) \quad \begin{pmatrix} i = 1, 2, \dots, n \\ k = 1, 2, \dots, m \end{pmatrix}.$$

Nimmt man $m < n$ und setzt voraus, dass man die symmetrischen Funktionen von weniger als n Grössen durch die elementaren ausdrücken könne, so ergibt die Entwicklung des linksstehenden Produktes, wenn man für die symmetrischen Funktionen der y ihre Werte als Funktionen der b einsetzt, als Koeffizienten von $b_1^{i_1} b_2^{i_2} \cdots b_m^{i_m}$ den Ausdruck der symmetrischen Funktion ($1^{i_1} 2^{i_2} \cdots m^{i_m}$) der x als Funktion der a . Für $m = n - 1$ erhält man alle symmetrischen Funktionen der x , in denen kein Exponent grösser als $n - 1$ ist. Hierin liegt keine Beschränkung, da jede beliebige symmetrische Funktion durch die Gleichungen:

$$f(x_i) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

auf eine solche zurückgeführt wird, in welcher jeder Exponent kleiner als n ist.

14) C. W. Borchardt, Berl. Ber. 1855, p. 165 = J. f. Math. 53, 1857, p. 193 = Werke, p. 97; Faà di Bruno, J. f. Math. 81, 1875, p. 217; C. Kostka, J. f. Math. 82, 1875, p. 212; W. Řehořovský, Casopis 11, 1882, p. 111.

15) Kronecker, Berl. Ber. 1880, p. 936.

6. Fundamentalsysteme. Unter einem „Fundamentalsystem“ für symmetrische Funktionen versteht man ein System rationaler symmetrischer Funktionen der Art, dass jede andere rationale symmetrische Funktion eine rationale Funktion der Funktionen des Systems ist. Ausser den elementaren symmetrischen Funktionen bilden, wie aus den Newton'schen Formeln hervorgeht, die Potenzsummen s_1, s_2, \dots, s_n ein Fundamentalsystem. *Borchardt*¹⁶⁾ hat gezeigt, dass auch die Potenzsummen $s_1, s_3, s_5, \dots, s_{2n-1}$ ein Fundamentalsystem bilden, und *Vahlen*¹⁷⁾, dass überhaupt diejenigen n ersten Potenzsummen ein Fundamentalsystem bilden, deren Indices nicht Vielfache einer gegebenen ganzen Zahl sind.

7. Sätze über Grad und Gewicht; Klassifikationen. Das Glied $a_1^{k_1} a_2^{k_2} \dots a_n^{k_n}$ hat das „Gewicht“ $k_1 + 2k_2 + 3k_3 + \dots + nk_n$. Haben alle Glieder der Funktion $\sum C_{k_1 k_2 \dots k_n} a_1^{k_1} a_2^{k_2} \dots a_n^{k_n}$ dasselbe Gewicht ϱ so heisst die Funktion „isobar“ vom Gewichte ϱ [I B 2, Nr. 18].

Eine typische symmetrische Funktion $(i_1 i_2 \dots i_n)$ ist als Funktion der Koeffizienten isobar vom Gewichte $i_1 + i_2 + \dots + i_n$. Ihr Grad in den Koeffizienten ist gleich dem höchsten der Exponenten i_1, i_2, \dots, i_n .¹⁸⁾ Umgekehrt, ersetzt man in einer ganzen Funktion der a_1, a_2, \dots, a_n diese durch die elementaren symmetrischen Funktionen, so ist in jedem Gliede der erhaltenen Funktion von x_1, x_2, \dots, x_n der höchste Exponent höchstens gleich dem Grade der Funktion in den a , und die Anzahl der Wurzeln, die in einem Gliede vorkommen, höchstens gleich dem Gewichte der Funktion¹⁹⁾.

Diese Sätze über Grad und Gewicht sind spezielle Fälle eines allgemeineren von *G. Kohn*²⁰⁾ aufgestellten Satzes. Bezeichnet man nämlich mit g_r den Grad der Funktion:

$$(i_1 i_2 \dots i_n) = \sum C_{k_1 k_2 \dots k_n} a_1^{k_1} a_2^{k_2} \dots a_n^{k_n}$$

in r Wurzeln, so ist die Summe

$$k_1 + 2k_2 + 3k_3 + \dots + (r-1)k_{r-1} + r(k_r + k_{r+1} + \dots + k_n)$$

im allgemeinen grösser als g_r und für bestimmte stets vorhandene Glieder gleich g_r ; und es ist die Summe

16) *Borchardt*, Berl. Ber. 1857, p. 301 = Werke, p. 107.

17) *Vahlen*, Acta math. 23, 1899 (erscheint demnächst).

18) *Sylvester*, Phil. Mag. (4) 5, 1853, p. 199; *Brioschi*, Ann. mat. fis. 5, 1854, p. 313; *Faà di Bruno*, Ann. mat. fis. 6, 1855, p. 338.

19) *Cayley*, Lond. Trans. 147, 1857, p. 490 = Coll. Pap. 2, p. 418.

20) *Wien. Ber.* 102, 2^a, 1893, p. 199.

$$rk_n + (r-1)k_{n-1} + \dots + 2k_{n-r} + k_{n-r-1}$$

im allgemeinen kleiner als g_r und für bestimmte stets vorhandene Glieder gleich g_r .

Ausser nach Grad und Gewicht sind die symmetrischen Funktionen in verschiedener Weise klassifiziert worden. Die Funktion $(1^4 2^2 3^1 \dots)$ heisst „ $(i_1 + i_2 + i_3 + \dots)$ -förmig“. Sie heisst „unitär“, wenn $i_1 > 0$, sonst „nonunitär“; sie heisst „binär“, wenn $i_1 = 0, i_2 > 0$; „ultra-binär“, wenn $i_1 = 0, i_2 = 0$, u. s. w. *G. Mathews* empfiehlt in eine Klasse zusammenzufassen die $(2^i + k)$ -ären Funktionen, für $k = 0, 1, 2, \dots, 2^i - 1$, da es für diese gemeinsame Fundamentalsysteme giebt (s. Nr. 8).

Mit Hülfe der Sätze über Grad und Gewicht ist man im Stande, den Ausdruck einer symmetrischen Funktion als Funktion der elementaren symmetrischen Funktionen, abgesehen von den Werten der Zahlenkoeffizienten, aufzustellen. Die Zahlenkoeffizienten bestimmt man entweder durch eine hinreichende Anzahl spezieller Wertsysteme der Wurzeln, oder aus den namentlich von *Brioschi*²¹⁾ aufgestellten partiellen Differentialgleichungen für eine symmetrische Funktion φ .

8. Partielle Differentialgleichungen und Differentialoperatoren. Die Brioschi'schen Differentialgleichungen zerfallen in die beiden Serien:

$$\text{I. } \sum_{\lambda=1}^n x_{\lambda}^i \frac{\partial \varphi}{\partial x_{\lambda}} = - \sum_{\lambda=1}^n (s_i a_{\lambda-1} + s_{i+1} a_{\lambda-2} + \dots) \frac{\partial \varphi}{\partial a_{\lambda}} = \sum_{\lambda=1}^{\infty} \lambda s_{\lambda+i-1} \frac{\partial \varphi}{\partial s_{\lambda}},$$

$$\text{II. } \sum_{\lambda=1}^n \frac{x_{\lambda}^i + a_1 x_{\lambda}^{i-1} + \dots + a_i}{f'(x_{\lambda})} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x_{\lambda}} = - \sum_{k=n-i}^n \frac{a_{k-n+i}}{f'(a_k)} \frac{\partial \varphi}{\partial a_k} = (n-i) \frac{\partial \varphi}{\partial s_{n-i}} \text{ } ^{22)};$$

der erste Ausdruck in II ist von *Netto*²³⁾ hinzugefügt worden. Netto hat ferner beide Serien aus einer gemeinsamen Quelle hergeleitet,

21) *F. Brioschi*, Ann. mat. fis. 5, 1854, p. 422 [Nr. 8].

22) Auf folgenden Unterschied ist aufmerksam zu machen: während es in

$\sum_{\lambda=1}^{\infty} \lambda s_{\lambda+i-1} \frac{\partial \varphi}{\partial s_{\lambda}}$ gleichgültig ist, durch welche und wie viele Potenzsummen φ

ausgedrückt wird, bleibt II im allgemeinen nur richtig, wenn in $(n-i) \frac{\partial \varphi}{\partial s_{n-i}}$

die Funktion φ durch s_1, s_2, \dots, s_n dargestellt ist. Man erkennt dies z. B. an

dem Falle $n=3, i=1, \varphi=s_4=a_1^4 - 4a_1^2 a_2 + 2a_2^2 + 4a_1 a_3 = \frac{1}{6} \{s_1^4 - 6s_1^2 s_2 + 8s_1 s_3 + 3s_2^2\}$. Hier wird $-\left\{\frac{\partial s_4}{\partial a_2} + a_1 \frac{\partial s_4}{\partial a_3}\right\} = -4a_2$ und $2 \frac{\partial s_4}{\partial s_2} = 0$, aber

$2 \frac{\partial}{\partial s_2} \frac{1}{6} \{s_1^4 - 6s_1^2 s_2 + 8s_1 s_3 + 3s_2^2\} = 2(s_2 - s_1^2) = -4a_2$.

23) *E. Netto*, Zeitschr. f. Math. u. Phys. 38, 1893, p. 357; 40, 1895, p. 375.

durch Substitution von $x_k + \frac{x_k^i}{f'(x_k)} t$ für x_k ($k = 1, 2, \dots, n$) in die Funktion φ , diese als Funktion einmal der x , zweitens der a , drittens der s genommen; die Vergleichung der Koeffizienten von t liefert eine Formelserie, aus der sich beide Serien I und II folgern lassen. Diese beiden Serien sind also nur der Form, nicht dem Inhalte nach von einander verschieden. Vermöge der Newton'schen Formeln und der Identitäten

$$x_\lambda^{n+k} + a_1 x_\lambda^{n+k-1} + \dots + a_n x_\lambda^k = 0 \quad \left(\begin{array}{l} \lambda = 1, 2, \dots, n \\ k = 0, 1, \dots, \infty \end{array} \right)$$

lassen sich alle Formeln von I aus den n ersten (für $i = 0, 1, \dots, n-1$) zusammensetzen, sodass es im wesentlichen nur n verschiedene solcher Formeln giebt. Die n Differentialgleichungen

$$-\sum_{k=n-i}^n a_{k-n+i} \frac{\partial \varphi}{\partial a_k} = (n-i) \frac{\partial \varphi}{\partial s_{n-i}} \quad (i = 0, 1, \dots, n-1)$$

werden benutzt, um die Zahlenkoeffizienten symmetrischer Funktionen zu berechnen, deren litteraler Teil in den a_1, a_2, \dots, a_n und vermöge der Newton'schen Formeln in den s_1, s_2, \dots, s_n vorliegt. Dass die Anzahl der erhaltenen Gleichungen zur Bestimmung der Koeffizienten ausreicht, hat *Netto* gezeigt (l. c.).

Die aus I für $\varphi = s_k$ und $\varphi = a_k$ folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned} \sum_{\lambda=1}^n x_\lambda^i \frac{\partial s_k}{\partial x_\lambda} &= k s_{k+i-1} \\ - \sum_{\lambda=1}^n x_\lambda^i \frac{\partial a_k}{\partial x_\lambda} &= s_i a_{k-1} + s_{i+1} a_{k-2} + \dots \end{aligned}$$

nebst den Newton'schen Identitäten sind nur dann charakteristisch für die Potenzsummen und für die elementaren symmetrischen Funktionen, wenn die Bedingungen $a_{n+1} = 0$, $a_{n+2} = 0, \dots$ hinzugenommen werden (*Netto* l. c.).

Die Differentialgleichungen gelten auch für nichtsymmetrische Funktionen. Z. B. erhält man aus I für $\varphi = x_k$ die Raabe'sche Differentialgleichung [II A 5 a, 7 c]:

$$-x_k^i = \sum_{\lambda=1}^n (s_i a_{\lambda-1} + s_{i+1} a_{\lambda-2} + \dots) \frac{\partial x_k}{\partial a_\lambda} \quad {}^{24)}.$$

Aus I erhält man für $i = 0, 1, 2$:

$$\begin{aligned}\sum_{\lambda=1}^n \frac{\partial \varphi}{\partial x_\lambda} &= - \sum_{\lambda=1}^n (n - \lambda + 1) a_{\lambda-1} \frac{\partial \varphi}{\partial a_\lambda} = \sum_{\lambda=1}^{\rho} \lambda s_{\lambda-1} \frac{\partial \varphi}{\partial s_\lambda} \\ \rho \varphi &= \sum_{\lambda=1}^n x_\lambda \frac{\partial \varphi}{\partial x_\lambda} = \sum_{\lambda=1}^n \lambda a_\lambda \frac{\partial \varphi}{\partial a_\lambda} = \sum_{\lambda=1}^{\rho} \lambda s_\lambda \frac{\partial \varphi}{\partial s_\lambda} \\ \sum_{\lambda=1}^n x_\lambda^2 \frac{\partial \varphi}{\partial x_\lambda} &= \sum_{\lambda=1}^n (-a_\lambda a_1 + (\lambda + 1) a_{\lambda+1}) \frac{\partial \varphi}{\partial a_\lambda} = \sum_{\lambda=1}^{\rho} \lambda s_{\lambda+1} \frac{\partial \varphi}{\partial s_\lambda},\end{aligned}$$

wenn ρ das Gewicht der Funktion φ ist. Aus der letzten Gleichung folgt für $\varphi = s_p$ und $\varphi = a_p$:

$$\begin{aligned}s_{p+1} &= \frac{1}{p} \sum (-a_\lambda a_1 + (\lambda + 1) a_{\lambda+1}) \frac{\partial s_p}{\partial a_\lambda} \\ a_{p+1} &= \frac{1}{p+1} \left\{ s_1 a_p - s_2 \frac{\partial a_p}{\partial s_1} - 2 s_3 \frac{\partial a_p}{\partial s_2} - 3 s_4 \frac{\partial a_p}{\partial s_3} - \dots \right\}.\end{aligned}$$

Hieraus erhält man, von $s_1 = -a_1$ ausgehend, successive die Potenzsummen als Funktionen der elementaren symmetrischen Funktionen und umgekehrt²⁵⁾.

Aus der Differentialgleichung:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial a_1} + a_1 \frac{\partial \varphi}{\partial a_2} + \dots + a_{n-1} \frac{\partial \varphi}{\partial a_n} + \frac{\partial \varphi}{\partial s_1} = 0$$

folgt, dass das Integral der Gleichung:

$$\left(\frac{\partial}{\partial a_1} + a_1 \frac{\partial}{\partial a_2} + a_2 \frac{\partial}{\partial a_3} + \dots + a_{n-1} \frac{\partial}{\partial a_n} \right) \varphi = 0$$

eine blosse Funktion von s_2, s_3, \dots, s_n ist. Allgemeiner hat *Sylvester*²⁶⁾ gezeigt, dass das Integral von

$$\left(\frac{\partial}{\partial a_1} + a_1 \frac{\partial}{\partial a_2} + a_2 \frac{\partial}{\partial a_3} + \dots + a_{n-1} \frac{\partial}{\partial a_n} \right)^i \varphi = 0$$

eine Funktion von der Form:

$$\varphi = F(s_{i+1}, \dots, s_n) + F_1(s_{i+1}, \dots, s_n) \cdot s_1 + \dots + F_{i-1}(s_{i+1}, \dots, s_n) \cdot s_1^{i-1} \text{ ist.}$$

Bezeichnet man den Operator

$$\frac{\partial}{\partial a_2} + a_1 \frac{\partial}{\partial a_{\lambda+1}} + a_2 \frac{\partial}{\partial a_{\lambda+2}} + \dots$$

mit d_i , so ergibt sich umgekehrt²⁷⁾:

25) *F. Junker*, Zeitschr. f. Math. u. Phys. 41, 1896, p. 199.

26) *Sylvester*, Par. C. R. 98, 1884, p. 858.

27) *P. A. Mac Mahon*, Brit. Ass. Rep. 1883; Lond. Math. Soc. Proc. 15, 1884, p. 20.

$$\frac{\partial}{\partial a_2} = d_2 + \mathfrak{s}_1 d_{2+1} + \mathfrak{s}_2 d_{2+2} + \dots,$$

wo \mathfrak{s}_i die Alephfunktion²⁸⁾ i^{ten} Grades ist.

Mit den Alephfunktionen stehen die symmetrischen Funktionen

$$s_{i+k}^{(i)} = \sum x_1^{1+g_1} x_2^{1+g_2} \dots x_i^{1+g_i} \quad \left(\sum_{h=1}^i g_h = k \right)$$

in Zusammenhang; es ist nämlich

$$(-1)^i s_{i+k}^{(i-1)} = \binom{i}{1} a_i \mathfrak{s}_k + \binom{i}{2} a_{i+1} \mathfrak{s}_{k-1} + \dots,$$

und die Anwendung von Differentialoperatoren führt *MacMahon* zu der Verallgemeinerung der Newton'schen Formeln:

$$s_{i+k}^{(i)} + a_1 s_{i+k-1}^{(i)} + a_2 s_{i+k-2}^{(i)} + \dots + (-1)^i a_{i+k} \frac{(i+k)!}{i! k!} = 0. \text{ }^{29)}$$

Eine nichtunitäre Funktion ist eine blossе Funktion von s_2, s_3, \dots, s_n , genügt also der Differentialgleichung:

$$\left(\frac{\partial}{\partial a_1} + a_1 \frac{\partial}{\partial a_2} + \dots \right) \varphi = 0,$$

und diese Differentialgleichung ist charakteristisch für eine nicht-unitäre Funktion³⁰⁾.

Eine ultrabinäre Funktion ist eine blossе Funktion von s_3, s_4, \dots, s_n , genügt also den Differentialgleichungen:

$$\left(\frac{\partial}{\partial a_1} + a_1 \frac{\partial}{\partial a_2} + \dots \right) \varphi = 0,$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial a_2} + a_1 \frac{\partial}{\partial a_3} + \dots \right) \varphi = 0$$

und diese Differentialgleichungen sind charakteristisch für eine ultrabinäre Funktion u. s. w.

Zu dem obigen Satz, betreffend nichtunitäre Funktionen, hat *J. Hammond*³⁰⁾ einen anderen über die Darstellbarkeit dieser Funktionen hinzugefügt: Eine nichtunitäre Funktion ist ganze Funktion von den Grössen

$$a'_{2h+i} = (-1)^h (2^{h-1}, 2+i) \quad \begin{pmatrix} i = 0, 1 \\ a'_0 = 1 \\ a'_1 = 0 \end{pmatrix}.$$

Diese beiden Sätze hat *Mathews*³¹⁾ verallgemeinert:

28) Vgl. Nr. 12.

29) *Mac Mahon* l. c.; *R. Lachlan*, Lond. Math. Soc. Proc. 18, 1887, p. 39 19, 1888, p. 294.

30) *Hammond*, ebenda 1882, p. 79; Amer. J. of math. 5, 1882, p. 218.

31) *G. B. Mathews*, Quart. Journ. 25, 1891, p. 127.

Eine ultraternäre Funktion, als Funktion der a'_k , genügt den beiden Differentialgleichungen:

$$\left(a'_0 \frac{\partial}{\partial a'_2} + a'_1 \frac{\partial}{\partial a'_3} + \dots\right) \varphi = 0,$$

$$\left(a'_0 \frac{\partial}{\partial a'_3} + a'_1 \frac{\partial}{\partial a'_4} + \dots\right) \varphi = 0;$$

und umgekehrt, eine ganze Funktion der a'_k , welche diesen beiden Differentialgleichungen genügt, ist ultraternär. Ferner: Eine ultraternäre Funktion ist ganze Funktion von den Grössen

$$a''_{4h+i} = (-1)^h (4^{h-1}, 4+i) \quad \left(\begin{array}{l} i = 0, 1, 2, 3 \\ a''_0 = 1 \\ a''_1 = a''_2 = a''_3 = 0 \end{array} \right).$$

Eine ultraseptenäre Funktion, als Funktion der a''_k , genügt den vier Differentialgleichungen:

$$\left(a''_0 \frac{\partial}{\partial a''_4} + a''_1 \frac{\partial}{\partial a''_5} + \dots\right) \varphi = 0,$$

$$\left(a''_0 \frac{\partial}{\partial a''_5} + a''_1 \frac{\partial}{\partial a''_6} + \dots\right) \varphi = 0,$$

$$\left(a''_0 \frac{\partial}{\partial a''_6} + a''_1 \frac{\partial}{\partial a''_7} + \dots\right) \varphi = 0,$$

$$\left(a''_0 \frac{\partial}{\partial a''_7} + a''_1 \frac{\partial}{\partial a''_8} + \dots\right) \varphi = 0;$$

und umgekehrt, eine ganze Funktion der a''_k , welche diesen vier Differentialgleichungen genügt, ist ultraseptenär. Ferner: Eine ultraseptenäre Funktion ist ganze Funktion von den Grössen

$$a'''_{8h+i} = (-1)^h (8^{h-1}, 8+i) \quad \left(\begin{array}{l} i = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \\ a'''_0 = 1 \\ a'''_1 = a'''_2 = \dots = a'''_7 = 0 \end{array} \right),$$

u. s. w.

9. Tabellen; tabellarische Gesetze. Das Cayley-Betti'sche Symmetriegesetz und seine Verallgemeinerung durch MacMahon. Tabellen für symmetrische Funktionen sind zuerst von *Vandermonde* (l. c.), später von *Meier Hirsch* (l. c.), *Bruno*, *Cayley*, *Řehořovský*, *Mac Mahon*, *Junker*, *Durfee*³²⁾ u. a. aufgestellt worden; vom letzt-

32) *Faà di Bruno*, Par. Compt. Rend. 76, 1873, p. 163; Gött. Nachr. 1875; *G. Metzler*, Die symm. Funkt., Darmstadt 1870; *W. Řehořovský*, Wien. Denkschr. 1882; math.-nat. Cl. 46, p. 51; *Cayley*, Amer. J. of math. 7, 1885, p. 47; *Mac Mahon*, Amer. J. of math. 6, 1884, p. 289; *W. P. Durfee*, Amer. J. of math. 5, 1882, p. 45; *J. Hopk. Circ.* 2, 1882, p. 23; ebenda 2, 1883, p. 72; Amer. J. of math. 5, 1882, p. 348; 9, 1887, p. 278; *Junker*, Wien. Denkschr. 64, 1896, p. 439.

genannten bis zum Gewichte 14. Die Anordnung solcher Tabellen ist aus dem Beispiel der Tafel vom Gewichte 3 ersichtlich:

$$\begin{array}{r|rrr}
 & a_3 & a_1 a_2 & a_1^3 \\
 \hline
 \sum x_1^3 & -3 & +3 & -1 \\
 \sum x_1^2 x_2 & +3 & -1 & \\
 \sum x_1 x_2 x_3 & -1 & &
 \end{array}$$

Ist ϱ das Gewicht der Tafel, so sind die Elemente der Nebendiagonale gleich $(-1)^{\varrho}$, die Elemente rechts derselben gleich Null und es ist die Tafel bezüglich der Hauptdiagonale symmetrisch. Damit dies stattfindet, müssen die „konjugierten“ der Glieder der Kopfzeile, mit $a_0 = 1$ homogen gemacht und $a_0 = A$, $a_1 = B$, $a_2 = C$, \dots gesetzt, sich von rechts nach links in alphabetischer Ordnung befinden und die Glieder der Kopfkolonne der Reihe nach „associiert“ denen der Kopfzeile sein³³⁾. Associiert zu $a_{\lambda}^{\lambda'} a_{\mu}^{\mu'} a_{\nu}^{\nu'} \dots$ heisst die symmetrische Funktion $(\lambda^{\lambda'} \mu^{\mu'} \nu^{\nu'} \dots)$; konjugiert zu $a_{\lambda}^{\lambda'} a_{\mu}^{\mu'} a_{\nu}^{\nu'} \dots$ ($\lambda > \mu > \nu \dots$) das Glied $a_{\lambda}^{\lambda - \mu} a_{\mu}^{\mu - \nu} a_{\nu}^{\nu - \dots} a_{\lambda' + \mu' + \nu' + \dots}^{\dots}$.

Ausser diesem Cayley'schen Symmetriegesetz giebt es einige andere Gesetze, welche die Aufstellung der Tafeln erleichtern. Z. B. ist die Summe der Koeffizienten der zu der symmetrischen Funktion $(i_1^{k_1} i_2^{k_2} \dots)$ gehörigen Zeile gleich $(-1)^{\sum k} \frac{(\sum k)!}{k_1! k_2! \dots}$. Ferner, wenn ϱ das Gewicht der Tafel ist, und man multipliziert die zu $a_{k_1} a_{k_2} \dots$ gehörige Kolonne mit $\frac{\varrho!}{k_1! k_2! \dots}$, so giebt jede Zeile die Summe Null, mit Ausnahme der letzten³⁴⁾.

Das Cayley'sche Symmetriegesetz ist von *Mac Mahon* verallgemeinert worden.

Setzt man:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= (1) \xi_1, \\
 x_2 &= (2) \xi_2 + (1^2) \xi_1^2, \\
 x_3 &= (3) \xi_3 + (21) \xi_2 \xi_1 + (1^3) \xi_1^3 \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

und wird:

$$\begin{aligned}
 \xi_{p_1} \xi_{p_2} \dots &= \sum \theta \cdot (q_1 q_2 \dots) x_{s_1} x_{s_2} \dots, \\
 x_{q_1} x_{q_2} \dots &= \sum \eta \cdot (p_1 p_2 \dots) \xi_{s_1} \xi_{s_2} \dots,
 \end{aligned}$$

so ist der Zahlenkoeffizient θ gleich dem Zahlenkoeffizienten η . Das

33) *Cayley*, Lond. Trans. 147, 1857, p. 489 = Coll. Pap. 2, p. 417; *Bruno*, Par. Compt. Rend. 76, 1873, p. 163; *Kohn*, Wien. Ber. 102, 1893, p. 199.

34) *Řehořovský*, l. c. 32); *J. Tzitzeica*, J. de math. spéc. (4) 4, 1895; p. 85.

Cayley'sche Gesetz ergibt sich aus diesem, wenn man nur die Koeffizienten der Potenzen von ξ_1 betrachtet ^{34a)}.

10. Mac Mahon's neue Theorie der symmetrischen Funktionen.

Das Mac Mahon'sche Symmetriegesetz kommt in dessen „neuer Theorie“ der symmetrischen Funktionen zur Geltung. Dieselbe beruht auf folgendem Theorem.

Man fasse das Symbol der monomen symmetrischen Funktion $(p_1 p_2 p_3 \dots)$ als „Partition“ der Zahl $p_1 + p_2 + p_3 + \dots$ auf [IB 2, Nr. 12]. Die Symbole der zusammengesetzten symmetrischen Funktionen $(p_1 p_2)$ $(p_3 p_4) p_5 \dots$, $(p_1 p_2 p_3)$ $(p_4 p_5) \dots$, u. s. w. repräsentieren dann zugleich „Separationen“ jener Partition. Ferner gehört zu jeder Separation eine Spezialpartition, z. B. zu $(p_1 p_2)$ $(p_3 p_4) p_5$ diese: $(p_1 + p_2, p_3 + p_4, p_5)$, und zu $(p_1 p_2 p_3)$ $(p_4 p_5) p_6$ diese: $(p_1 + p_2 + p_3, p_4 + p_5, p_6)$. Nunmehr besteht der Satz:

Die Funktion $(p_1 + p_2 + p_3 + \dots, q_1 + q_2 + q_3 + \dots, r_1 + r_2 + r_3 + \dots, \dots)$ ist als lineares Aggregat der Separationen von $(p_1 p_2 p_3 \dots q_1 q_2 q_3 \dots r_1 r_2 r_3 \dots)$ darstellbar; und zwar treten diese Separationen nur in denjenigen Verbindungen und mit den Koeffizienten auf, die sie in den zugehörigen χ -Produkten haben. Z. B. hat $\xi_1^3 \xi_2$ in $\chi_2 \chi_3$ den Koeffizienten $(21)(1^2) + (1^3)(2)$, ferner $\xi_1^3 \xi_2$ in $\chi_2^2 \chi_1$ den Koeffizienten $2(2)(1^2)(1)$. Durch die Separationen (21^3) , $(21^2)(1)$, $(21)(1^2) + (1^3)(2)$, $(21)(1)^2$, $2(2)(1^2)(1)$, $(2)(1)^3$ von (21^3) lassen sich also die zugehörigen Spezialpartitionen: (5) , (41) , (32) , (31^2) , $(2^2 1)$, (21^3) ausdrücken und umgekehrt. Beide Koeffiziententafeln werden bei geeigneter Anordnung symmetrisch, z. B.:

	(5)	(41)	(32)	(31 ²)	(2 ² 1)	(21 ³)
(21 ³)						1
(21 ²)(1)				1	2	3
(21)(1 ²) + (1 ³)(2)			1	3	2	4
(21)(1) ²		1	3	4	6	6
2(2)(1 ²)(1)		2	2	6	1	6
(2)(1) ³	1	3	4	6	6	6

Auf die gewöhnliche Theorie der symmetrischen Funktionen kommt man zurück, wenn man nur die Separationen von $(1111\dots)$ einführt. Jeder Formel der gewöhnlichen Theorie entspricht eine allgemeinere Formel der neuen Theorie.

^{34a)} W. H. Metzler, Lond. Math. S. Proc. 28, 1897, p. 390 stellt drei Gesetze auf, die gewisse symmetrische Funktionen durch schon bekannte ausdrücken.

An die Stelle der Newton'schen Formeln:

$$\begin{aligned}s_1 - (1) &= 0, \\ s_2 - (1)s_1 + 2(1^2) &= 0 \\ &\vdots\end{aligned}$$

treten die allgemeineren:

$$\begin{aligned}s_\lambda - (\lambda) &= 0, \\ s_{\lambda+1} - (1)s_\lambda + (\lambda 1) &= 0, \\ s_{\lambda+2} - (1)s_{\lambda+1} + (1^2)s_\lambda - (\lambda 1^2) &= 0, \\ &\vdots\end{aligned}$$

zusammenzufassen in die eine:

$$\sum_{i=1}^n \frac{x_i^2 x^2}{1 - x_i x} = s_\lambda x^2 + s_{\lambda+1} x^{2+1} + \dots = \frac{(\lambda) x^2 - (\lambda 1) x^{2+1} + (\lambda 1^2) x^{2+2} - \dots}{1 - (1) x + (1^2) x^2 - \dots}.$$

Aus diesen Formeln ergibt sich s_k , ausgedrückt durch Separationen von $(\lambda 1^{k-\lambda})$.

Setzt man zur Abkürzung:

$$\sigma_\lambda^{(h)} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2 x^2}{(1 - x_i x)^h} = s_\lambda x^2 + \frac{h(h+1)}{1 \cdot 2} s_{\lambda+1} x^{2+1} + \dots,$$

so ergibt sich allgemeiner:

$$\begin{aligned}\sigma'_\lambda \sigma'_\mu - \sigma''_{\lambda+\mu} &= \frac{(\lambda \mu) x^{2+\mu} - (\lambda \mu 1) x^{2+\mu+1} + \dots}{1 - (1) x + \dots}, \\ \sigma'_\lambda \sigma'_\mu \sigma'_\nu - \sigma'_\lambda \sigma''_{\mu+\nu} - \sigma'_\mu \sigma''_{\lambda+\nu} - \sigma'_\nu \sigma''_{\lambda+\mu} + 2 \sigma'''_{\lambda+\mu+\nu} \\ &= \frac{(\lambda \mu \nu) x^{2+\mu+\nu} - (\lambda \mu \nu 1) x^{2+\mu+\nu+1} + \dots}{1 - (1) x + \dots}\end{aligned}$$

u. s. w., analog den Waring'schen oder der Faà di Bruno'schen Formel. Aus diesen Formeln ergeben sich die Potenzsummen ausgedrückt durch Separationen von $(\lambda \mu 1 1 1 \dots)$, von $(\lambda \mu \nu 1 1 1 \dots)$, u. s. w. Für das Gleichwerden einiger von den Indices $\lambda, \mu, \nu \dots$ erleiden die Formeln dieselbe Modifikation wie die Waring'schen.

Durch die Separationen einer beliebigen Partition $(\lambda^l \mu^m \dots)$ von h lässt sich s_h ausdrücken vermöge einer der Girard'schen analogen Formel:

$$\begin{aligned}&(-1)^{l+m+\dots} \frac{(l+m+\dots-1)!}{l! m! \dots} s_h \\ &= \sum (-1)^{j_1+j_2+\dots} \frac{(j_1+j_2+\dots-1)!}{j_1! j_2! \dots} (J_1)^{j_1} (J_2)^{j_2} \dots,\end{aligned}$$

in welcher sich die Summation auf alle Separationen $(J_1)^{j_1} (J_2)^{j_2} \dots$ von $(\lambda^l \mu^m \dots)$ bezieht.

Auch die auf die Tabellen bezüglichen Gesetze haben ihre Analoga in der neuen Theorie. Z. B.: im Ausdruck der symmetrischen Funktion

$(p_1^{\tau_1} p_2^{\tau_2} \dots)$ durch die Separationen von $(t_1^{\tau_1} t_2^{\tau_2} \dots)$ ist die Koeffizientensumme in jeder Gruppe gleich Null, wenn die Partition $(p_1^{\tau_1} p_2^{\tau_2} \dots)$ keine Separationen der Spezialpartition $(\tau_1 t_1, \tau_2 t_2, \dots)$ besitzt. In eine Gruppe werden dabei z. B. die vier Separationen

$$(\lambda^2)(\lambda\mu)(\mu), \quad (\lambda^2)(\lambda)(\mu)^2, \quad (\lambda^2\mu)(\lambda)(\mu), \quad (\lambda^2\mu)(\lambda\mu)$$

gerechnet, weil aus jeder von ihnen nach Fortlassung von λ die Separation $(\mu)^2$, nach Fortlassung von μ die Separation $(\lambda^2)(\lambda)$ entsteht³⁵⁾.

11. Beziehungen zur Zahlentheorie. Bezeichnet man mit $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ eine für eine beliebige Elementenzahl definierte symmetrische Funktion, und setzt:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_k) = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \sum f(x_2, x_3, \dots, x_k) + \sum f(x_3, x_4, \dots, x_k) \\ + \dots + \sum f(x_k) + f(0),$$

wo die \sum kombinatorische Summen bedeuten, so ist umgekehrt:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = F(x_1, x_2, \dots, x_n) - \sum F(x_2, \dots, x_n) + \sum F(x_3, \dots, x_n) \\ + \dots + (-1)^{n-1} \sum F(x_n) + (-1)^n F(0).$$

Dieser Satz von *Baker*³⁶⁾ ist eine Verallgemeinerung bekannter zahlen-theoretischer Sätze. Sind z. B. die x die Primfaktoren einer durch kein Quadrat teilbaren Zahl n und $f(x_1, x_2, \dots, x_k) = f(x_1 x_2 \dots x_k)$, so ergibt sich $f(n) = \sum_i F\left(\frac{n}{d}\right) \mu(d)$ als Folge von $F(n) = \sum f(d)$, wo sich die Summationen auf alle Divisoren d von n beziehen und μ den Möbius'schen Faktor bezeichnet [I C 1].

Hieran anknüpfend zeigt *Gegenbauer*³⁷⁾ an mehreren Beispielen, dass überhaupt Theoreme der Zahlentheorie, welche in letzter Linie auf der Zerlegung ganzer Zahlen in Primfaktoren fussen, Analoga im Gebiete der Funktionen mehrerer Veränderlichen haben. *Gegenbauer* zeigt aber auch, dass diese Sätze nicht auf symmetrische Funktionen beschränkt sind.

12. Spezielle symmetrische Funktionen. Von speziellen symmetrischen Funktionen sind bemerkenswert die von *Jacobi*, *Johnson*, *Nägelsbach*, *Kostka*, *Wronski* u. a. betrachteten und von letztgenanntem

35) Über *Mac Mahon's* neue Theorie vgl. namentlich: *Mac Mahon*, Amer. J. of math. 11, 1889, p. 1; 12, 1890, p. 61. Ferner: Amer. J. of math. 10, 1888, p. 42; 13, 1891, p. 193; 14, 1892, p. 15; Quart. J. 22, 1887, p. 74; 23, 1889, p. 139; Lond. Math. Soc. Proc. 19, 1888, p. 220; Lond. Trans. 181, 1890, p. 181.

36) *H. F. Baker*, Lond. Math. Soc. Proc. 21, 1890, p. 30.

37) *L. Gegenbauer*, Wien. Ber. 102, 2^a, 1893, 951.

als „Alephfunktionen“ bezeichneten Funktionen. Bezeichnet man mit $\aleph_m(x_1, x_2, \dots, x_n)$ die Summe aller Produkte m^{ter} Ordnung, die sich aus x_1, x_2, \dots, x_n bilden lassen, so ist dies die Alephfunktion m^{ter} Ordnung. Dieselbe ist auch zu definieren durch:

$$\aleph_{r-n+1} = \frac{|x_i^h|}{|x_i^k|} = \sum_i \frac{x_i^r}{f'(x_i)} \quad \left(\begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, n \\ h = 0, 1, \dots, n-2, r \\ k = 0, 1, \dots, n-2, n-1 \end{array} \right),$$

woraus insbesondere für $r \leq n-1$ die Euler'schen Formeln folgen.

Diese Funktionen sind in vielen Beziehungen analog den elementaren symmetrischen Funktionen; z. B. ist:

$$\aleph_m(x_1, \dots, x_n) = \aleph_m(x_1, \dots, x_k) + \aleph_{m-1}(x_1, \dots, x_k) \aleph_1(x_{k+1}, \dots, x_n) + \dots + \aleph_m(x_{k+1}, \dots, x_n),$$

ferner, entsprechend der Newton'schen und der Girard'schen Formel:

$$\aleph_r + a_1 \aleph_{r-1} + \dots + a_n \aleph_{r-n} = 0,$$

$$\aleph_r = \sum_{(i_1 + 2i_2 + \dots + ni_n = r)} (-1)^{i_1 + i_2 + \dots + i_n} \frac{(i_1 + i_2 + \dots + i_n)!}{i_1! i_2! \dots i_n!} a_1^{i_1} a_2^{i_2} \dots a_n^{i_n}.$$

Ein anderes Analogon der Newton'schen Formel ist die von *Crocchi*:

$$\aleph_{r-1} s_1 + \aleph_{r-2} s_2 + \dots + \aleph_1 s_{r-1} + s_r = r \aleph_r.$$

Die allgemeinere Funktion

$$\frac{|x_i^m|}{|x_i^k|} \quad \left(\begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, n \\ k = 0, 1, \dots, n-1 \end{array} \right)$$

lässt sich durch Alephfunktionen ausdrücken; sie ist gleich

$$|\aleph_{m_k-i}| \quad (i, k = 0, 1, \dots, n-1),$$

dieselbe lässt sich auch als Determinante der Koeffizienten a_1, \dots, a_n darstellen.

Man kann dies zur Darstellung einer beliebigen ganzen symmetrischen Funktion durch die Koeffizienten benutzen; denn eine solche zerfällt durch Multiplikation mit

$$|x_i^k| \quad \left(\begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, n \\ k = 0, 1, \dots, n-1 \end{array} \right)$$

in derartige Funktionen: $|x_i^{m_k}|$.³⁸⁾

38) *K. G. J. Jacobi*, J. f. Math. 22, p. 360 = Werke 3, p. 439; *H. Nögelsbach*, Üb. eine Klasse symm. Funkt., Zweibrücken 1872; J. f. Math. 81, 1875, p. 281; *N. Trudi*, Gi. di mat. 3, 1865; *L. Crocchi*, Gi. di mat. 17, 1879, p. 218; 18, 1880, p. 377; 20, 1882, p. 301; *Sylvester*, Johns Hopk. Circ. 2, 1882, p. 2; *F. Franklin*, ebenda 2, 1882, p. 24; *O. H. Mitchell*, ebenda 2, 1882, p. 242; Amer.

13. Symmetrische Funktionen von Wurzeldifferenzen; Sem-invarianten. Besondere Bedeutung haben diejenigen symmetrischen Funktionen erlangt, welche zugleich symmetrische Funktionen der Wurzeldifferenzen sind. Sind $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$ Produkte von Wurzeldifferenzen und ist $\Phi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots$ eine derartige Funktion, so ist Φ eine Invariante [I B 2, Nr. 2], wenn jede Wurzel in jedem Gliede φ_i gleich oft, q -mal, vorkommt; Φ ist dann offenbar vom Gewichte $\frac{nq}{2}$. Andernfalls heisst Φ eine Seminvariante [I B 2, Nr. 23] (Semi-Invariante, Subinvariante, péninvariant). Eine Seminvariante Φ der Gleichung:

$$x^n + \binom{n}{1} a_1 x^{n-1} + \binom{n}{2} a_2 x^{n-2} + \dots = 0$$

ändert sich der Definition zufolge nicht bei der Substitution

$$x_k \parallel x_k + \theta, \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

also, als Funktion der Koeffizienten betrachtet, nicht bei der Substitution

$$\begin{aligned} a_1 &\parallel a_1 + \theta \\ a_2 &\parallel a_2 + 2a_1\theta + \theta^2 \\ a_3 &\parallel a_3 + 3a_2\theta + 3a_1\theta^2 + \theta^3, \\ &\vdots \end{aligned}$$

die man zusammenfassen kann in:

$$1 + \frac{a_1}{x} + \frac{a_2}{2!x^2} + \frac{a_3}{3!x^3} + \dots \parallel e^{\frac{\theta}{x}} \left(1 + \frac{a_1}{x} + \frac{a_2}{2!x^2} + \frac{a_3}{3!x^3} + \dots \right).$$

Die Heranziehung der Identität:

$$1 + \frac{a_1}{x} + \frac{a_2}{2!x^2} + \dots = e^{\frac{s_1}{x} + \frac{s_2}{2x^2} + \frac{s_3}{3x^3} + \dots}$$

zeigt, dass sich bei jener Substitution von den Potenzsummen s_1, s_2, s_3, \dots der Gleichung:

$$x^n + a_1 x^{n-1} + \frac{a_2}{2!} x^{n-2} + \frac{a_3}{3!} x^{n-3} + \dots = 0$$

nur s_1 ändert, sodass die Seminvariante Φ von s_1 unabhängig, eine nicht-unitäre Funktion der Gleichung

$$x^n + a_1 x^{n-1} + \frac{a_2}{2!} x^{n-2} + \dots = 0$$

ist. Dieser Sylvester'sche Satz gilt allgemeiner auch für solche symmetrische Funktionen der Wurzeln, welche unsymmetrische Funktionen der Wurzeldifferenzen sind (*Netto*), wie aus der obigen Herleitung hervorgeht. Die Seminvariante Φ genügt den Differentialgleichungen:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a_1} + 2a_1 \frac{\partial \Phi}{\partial a_2} + 3a_2 \frac{\partial \Phi}{\partial a_3} + \dots = 0,$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} = \sum \lambda_{s_i-1} \frac{\partial \Phi}{\partial s_i} = 0,$$

charakteristisch für symmetrische Funktionen, die unsymmetrisch in den Wurzeldifferenzen sind³⁹⁾.

Über die hierhergehörigen Sturm'schen Funktionen vgl. I B 3 a, Nr. 5.

14. Zweiwertige und alternierende Funktionen. Eine rationale Funktion von x_1, x_2, \dots, x_n , welche bei allen $n!$ Permutationen der x_1, x_2, \dots, x_n w Werte annimmt, heisst eine w -wertige Funktion.

Sind φ_1 und φ_2 die beiden Werte einer zweiwertigen Funktion, so ist auch $\varphi_1 - \varphi_2$ eine zweiwertige Funktion; die beiden Werte derselben $\varphi_1 - \varphi_2$ und $\varphi_2 - \varphi_1$ unterscheiden sich nur durch das Vorzeichen. Eine solche Funktion heisst „alternierend“. Das Differenzenprodukt:

$$\Pi(x_i - x_k) \quad \left(\begin{matrix} i, k = 1, 2, \dots, n \\ i < k \end{matrix} \right)$$

ist eine alternierende Funktion, sein Quadrat eine symmetrische Funktion:

$$\Delta(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Jede alternierende Funktion ist in der Form $B\sqrt{\Delta}$ enthalten, wo B eine symmetrische Funktion.

Jede zweiwertige Funktion ist in der Form $A + B\sqrt{\Delta}$ enthalten, wo A und B symmetrische Funktionen sind; und umgekehrt. Die beiden Werte einer zweiwertigen Funktion φ sind die Wurzeln einer quadratischen Gleichung

³⁹⁾ Sylvester, Amer. J. of math. 5, 1882, p. 79; Cayley, Quart. J. 19, 1883, p. 131 = Pap. 12, p. 22; Mac Mahon, Amer. J. of math. 6, 1884, p. 131; Quart. J. 19, p. 337; Sylvester, Par. C. R. 98, 1884, p. 779, 858; J. Tannery, Par. C. R. 98, 1884, p. 1420; Sylvester u. W. S. Curran Sharp, Educ. Times 42, 1885, p. 86; Cayley, Quart. J. 20, 1885, p. 212 = Pap. 12, p. 326; Mac Mahon, ebenda 20, 1885, p. 362; Cayley, ebenda 21, 1886, p. 92 = Pap. 12, p. 344; D. F. Seliwanow, Mosk. Math. Samml. 16, 1891; Cayley, Lond. Trans. 158, 1868 = Pap. 6, p. 292; Amer. J. of math. 15, 1893, p. 1. — Weitere Litteratur s. namentlich bei W. F. Meyer, Bericht über die Fortschritte der projektiven Invariantentheorie im letzten Vierteljahrhundert, Deutsche Math.-Ver. 1, 1892, p. 245 ff. [I B 2, Nr. 23].

$$\varphi^2 - P\varphi + Q = 0,$$

deren Koeffizienten P und Q symmetrische Funktionen sind; aber nicht umgekehrt [*Cauchy, Abel*, s. I A 6, Anm. 46].

15. Mehrwertige Affektfunktionen. Gruppe [I A 6, Nr. 5]. Die sämtlichen Permutationen der Wurzeln, bei denen eine w -wertige Funktion ungeändert bleibt, bilden eine Gruppe: die „Gruppe der Funktion“. Umgekehrt heisst die Funktion eine „Funktion der Gruppe“.

16. Allgemeine Sätze von Lagrange, Galois, Jordan [I A 6, Nr. 5]. Die w Werte einer w -wertigen Funktion sind die w Wurzeln einer Gleichung w^{ten} Grades, deren Koeffizienten rationale Funktionen von a_1, a_2, \dots, a_n sind⁴⁰⁾.

Ist die Gruppe der Funktion φ unter der von ψ enthalten, so ist ψ eine rationale Funktion von φ mit Koeffizienten, welche rationale Funktionen von a_1, a_2, \dots, a_n sind⁴¹⁾.

Funktionen mit einer gemeinsamen Gruppe sind rationale Funktionen von einander, mit Koeffizienten, welche Funktionen der Gruppe sind⁴²⁾.

17. Mögliche Wertezahlen [I A 6, Nr. 8]. Die Wertezahl w muss offenbar $\leq n!$ sein; dass sie stets ein Teiler von $n!$ sein muss, hat *Lagrange* (a. a. O.) gezeigt. Aber nicht alle Teiler von $n!$ können Wertezahlen sein. Die ersten einschränkenden Sätze fanden *Ruffini, Abbat*i, *Cauchy*: es giebt keine 3- oder 4-wertige Funktionen von 5 Elementen; es giebt keine 3- oder 4- oder 5-wertige Funktionen von 6 Elementen; eine weniger als 5-wertige Funktion ist 2- oder 1-wertig; eine weniger als p - (grösste Primzahl unter n) wertige Funktion ist 2- oder 1-wertig.

Diese Sätze sind besondere Fälle des Bertrand'schen Satzes: eine weniger als n -wertige Funktion von n Elementen ist 2- oder 1-wertig; ausgenommen $n = 4$, in welchem Fall es 3-wertige Funktionen giebt.

Bertrand bewies diesen Satz auf Grund des Postulates: zwischen $a + 1$ und $2a$ ($a > 2$) liegt eine Primzahl, welches erst später von *L. Tchebicheff* bewiesen wurde [I C 3].

Ausser den Sätzen, welche die Wertezahl beschränken, giebt es Sätze, welche für gegebene Wertezahl die Form der Funktion bestimmen; z. B. eine n -wertige Funktion ist symmetrisch in $n - 1$ Elementen, ausgenommen $n = 6$ (*Bertrand*).

40) *L. Lagrange*, Paris. Ac. Hist. 1771; *Vandermonde*, ebenda [I A 6, Anm. 30].

41) *É. Galois*, J. de math. 1846, p. 381.

42) *C. Jordan*, Traité des substitutions, Paris 1870.

Weitere Sätze sind von *Serret*, *Mathieu*, *Jordan*, *Bochert* u. a. aufgestellt worden⁴³⁾.

18. Herstellung von Affektfunktionen, Kirkman's Problem. Die Summe aller derjenigen Glieder einer ganzen w -wertigen Funktion, welche durch die Permutationen der Gruppe aus einem derselben hervorgehen, bildet eine „Elementarfunktion“ (*Kirkman* l. c.). Eine Elementarfunktion, welche einen Teil der symmetrischen Funktion $(i_1^{\mu_1} i_2^{\mu_2} \dots)$ bildet, wird mit $(i_1^{\mu_1} i_2^{\mu_2} \dots)$ bezeichnet. Alle aus einer Elementarfunktion durch Änderung der Exponenten $i_1, i_2, i_3 \dots$ (wobei aber stets $i_h \neq i_k$) hervorgehenden Funktionen haben dieselbe Gruppe und bilden eine „Familie“ $(\mu_1, \mu_2, \mu_3 \dots)$. Die Aufgabe: alle zu einem System $\mu_1, \mu_2, \mu_3 \dots$ und alle zu einer Gruppe gehörenden Familien zu finden, bezeichnet *Jordan* (l. c.) als „Kirkman's Problem“. Einige Beispiele hierzu hat *Kirkman* gegeben.

19. Aufzählungen. Aufzählungen aller möglichen Funktionen bzw. Gruppen sind von *Cayley*, *Askwith*, *Miller* u. a.⁴³⁾ bis zu $n = 14$ vorgenommen worden (vgl. I A 6, Nr. 13).

20. Rationalwerden von Affektfunktionen; Affekt einer Gleichung. Wenn eine w -wertige Funktion einer Gleichung niedrigeren als w^{ten} Grades genügt, so giebt es w' -wertige Funktionen, welche linearen Gleichungen genügen. Alsdann sagt *Kronecker*⁴⁴⁾, in Anlehnung an *Jacobi*, die Gleichung $f(x) = 0$ habe einen „Affekt“; die Funktionen, deren Rationalwerden den Affekt bedingt, heißen „Affektfunktionen“. Die Gruppe der Affektfunktionen ist die Gruppe der Gleichung.

21. Cyklische, cykloïdische, metacyklische Funktionen. Funktionen, welche sich nicht bei den Substitutionen

$$\begin{pmatrix} x_k \\ x_{k+k'} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} k, k' = 0, 1, \dots, n-1 \\ x_{k+n} = x_k \end{pmatrix}$$

43) *Cauchy*, J. éc. pol. 10, 1815, cah. 17, p. 1, 29; *J. Bertrand*, J. éc. pol. 18, 1845, cah. 30, p. 123; *J. A. Serret*, J. d. Math. (1) 15, 1850, p. 1 u. 45; *E. Mathieu*, J. d. Math. (2) 5, 1860, p. 9; Par. Compt. Rend. 1858, p. 46; *Jordan*, J. éc. pol. 22, 1861, cah. 38, p. 113; *E. Mathieu*, J. d. Math. (2) 6, 1861, p. 241; *Th. P. Kirkman*, Theory of groups and manyvalued functions, Manchester 1861; Memoirs of the lit. and phil. soc. of Manchester, Lond. u. Par. 1862; *Netto*, J. f. Math. 85, 1878, p. 327; *A. Bochert*, Math. Ann. 33, 1889, p. 584; *E. H. Askwith*, Quart. J. 24, 1890, p. 111 u. 263; *Cayley*, ebenda 25, 1891, p. 71 u. 137 = Pap. 13, p. 117; *G. B. Mathews*, ebenda 25, 1891, p. 127; *A. Bochert*, Math. Ann. 40, 1892, p. 157; *E. Cartan*, Paris Compt. Rend. 119, 1894; *Bochert*, Math. Ann. 49, 1897, p. 113.

44) *Kronecker*, Arithm. Theorie d. alg. Grössen, 1881, p. 34 = Werke 2, p. 284.

ändern, heissen „cyklische“; Funktionen von den $n_1 n_2 \dots n_h$ Grössen

$$x_{k_1 k_2 \dots k_h} \left(\begin{array}{l} k_1 = 0, 1, \dots, n_1 - 1 \\ k_2 = 0, 1, \dots, n_2 - 1 \\ \vdots \\ x_{k_1+n_1, k_2, \dots} = x_{k_1, k_2+n_2, \dots} \\ \phantom{x_{k_1+n_1, k_2, \dots}} = x_{k_1, k_2, \dots} \end{array} \right),$$

solche, welche sich nicht bei den Substitutionen

$$\left(\begin{array}{l} x_{k_1, k_2, \dots, k_h} \\ x_{k_1+k_1', k_2+k_2', \dots, k_h+k_h'} \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{l} k_1, k_1' = 0, 1, \dots, n_1 - 1 \\ k_2, k_2' = 0, 1, \dots, n_2 - 1 \\ \vdots \end{array} \right)$$

ändern, heissen „cykloldische“⁴⁵⁾.

Ist n prim, so heisst eine Funktion, welche sich nicht bei den Substitutionen

$$\left(\begin{array}{l} x_k \\ x_{r+k+s} \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{l} k = 0, 1, \dots, n-1 \\ s = 0, 1, \dots, n-1 \\ r = 1, 2, \dots, n-1 \\ x_{k+n} = x_k \end{array} \right)$$

ändert, eine „metacyklische“⁴⁶⁾. Beschränkt man die Werte von r auf die quadratischen Reste von n , so heisst die zugehörige Funktion „hemimetacyklisch“⁴⁷⁾ [I A 6, Nr. 10].

22. Durch Wurzeln auflösbare Gleichungen. Durch Quadratwurzeln auflösbare Gleichungen [I B 3 c, d, Nr. 28]. Für die Auflösbarkeit einer Gleichung von Primzahlgrad durch Radikale ist das Rationalwerden der metacyklischen Funktionen notwendig und hinreichend.

Für die Auflösbarkeit einer Gleichung durch Quadratwurzeln ist das Rationalwerden derjenigen Affektfunktionen erforderlich und hinreichend, welche die grösstmögliche ungrade Wertezahl haben. Die Ordnung der Gruppe ist die grösste in $n!$ enthaltene Potenz von 2 [I B 3 c, d, Nr. 14].

23. Gleichungen 7^{ten} Grades, deren 30-wertige Affektfunktionen rational sind [I B 3 f, Nr. 16]. Von Gleichungen höheren Grades, welche einen Affekt haben, sind insbesondere diejenigen 7^{ten} Grades, deren 30-wertige Affektfunktionen rational sind, untersucht worden. Dieselben

45) Von Kronecker in seinen Vorlesungen gebraucht.

46) Zuerst von Kronecker im Sinne des Textes, später von H. Weber in allgemeinerem Sinne gebraucht; s. Weber, Algebra 1.

47) Kronecker.

sind die Resolventen der bei der Transformation 7^{ter} Ordnung der elliptischen Funktionen auftretenden Modulargleichung 8^{ten} Grades⁴⁸⁾.

24. Funktionen von mehreren Variabelreihen, Wurzeln von Gleichungssystemen. Berechnung symmetrischer Funktionen nach Poisson, v. Escherisch. Eine Funktion von n Systemen von je k Grössen:

$$x_1, x_2, \dots, x_n$$

$$y_1, y_2, \dots, y_n$$

⋮

heisst eine „symmetrische Funktion der n Systeme“, wenn sie sich bei Vertauschung derselben nicht ändert.

Eine rationale symmetrische Funktion ist Quotient zweier ganzen symmetrischen Funktionen (*Mertens*).

Eine ganze symmetrische Funktion zerfällt in „typische“ oder „eintypige“ Funktionen, d. h. in solche, welche aus einem Gliede durch Summation aller daraus durch Vertauschung der Systeme hervorgehenden verschiedenen Glieder entstehen. Man beschränkt sich auf die Betrachtung solcher symmetrischen Funktionen im engeren Sinne.

Eine solche Funktion heisst „ r -förmig“, wenn in jedem Gliede Elemente aus r Systemen vorkommen. Sie heisst „elementar“, wenn sie linear in den Elementen jedes Systems ist. Sie heisst „ h -reihig“, wenn in jedem Gliede Elemente aus h Reihen vorkommen. Sie heisst „primitiv“, wenn sie linear in den Elementen jeder Reihe ist (*Junker*).

Bezüglich der Berechnung symmetrischer Funktionen von mehreren Grössenreihen tritt eine Zweiteilung des Problems ein, je nachdem die Grössen als Wurzelsysteme von Gleichungssystemen gegeben sind oder nicht.

In beiden Fällen werden zunächst die mehrförmigen Funktionen durch die Waring'schen Formeln auf einförmige zurückgeführt; setzt man

$$\sum x_i^{p_1} y_i^{q_1} \dots x_k^{p_2} y_k^{q_2} \dots = (\overline{p_1 \ q_1 \ \dots}, \overline{p_2 \ q_2 \ \dots})$$

u. s. w., so wird:

48) *Kronecker*, Berl. Ber. 1858, p. 287; *Hermite*, Annal. di mat. 1859; Par. C. R. 57, 1863, p. 750; *Brioschi*, Gött. Nachr. 1869; *Klein*, Math. Ann. 14, 1879, p. 428; 15, 1879, p. 251; *Noether*, ebenda 15, 1879, p. 89; *Brioschi*, ebenda 15, 1879, p. 241; Par. C. R. 95, 1882, p. 665, 814, 1254; *P. Gordan*, Math. Ann. 20, 1882, p. 515 (auch Bd. 17 u. 19), der p. 527 ein „volles System“ von Affektfunktionen aufstellt [IB 2, Nr. 5, Anm. 107]; *Cayley*, J. f. Math. 113, 1894, p. 42 = Pap. 13, p. 473. Des weiteren vgl. IB 3 c, d, Nr. 23). — Der Fall des Textes ist als ein bes. charakteristisches Beispiel gewählt worden.

$$(\overline{p_1 q_1 \dots}, \overline{p_2 q_2 \dots}) = (\overline{p_1 q_1 \dots}) (\overline{p_2 q_2 \dots}) - (\overline{p_1 + p_2, q_1 + q_2 \dots})$$

u. s. w., analog den Formeln für Funktionen einer Grössenreihe.

Um ferner die einförmigen Funktionen:

$$\sum x_i^p y_i^q \dots = s_{pq\dots}$$

durch die Koeffizienten des Gleichungssystems

$$f_i(x, y, \dots) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, k)$$

auszudrücken, berechne man die Potenzsummen der Wurzeln t der Gleichung, die sich durch Elimination von x, y, \dots aus den Gleichungen

$$t = ux + vy + \dots$$

$$f_i(x, y, \dots) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, k)$$

ergibt. Dann ist $s_{pq\dots}$ der Koeffizient von $\frac{(p+q+\dots)!}{p! q! \dots} u^p v^q \dots$ in der Entwicklung von $\sum_i t_i^{p+q+\dots}$ nach Potenzen von u, v, \dots (*Poisson, Schläfli, Hess*).

Anders verfährt *Waring* (l. c.): er bildet die Gleichung für $t = x^p y^q \dots$ und sucht deren Wurzelsumme.

So kommt man zu dem Satze: Jede symmetrische Funktion der Wurzelsysteme eines Gleichungssystems ist rationale Funktion der Koeffizienten des Gleichungssystems (*Cayley, Schläfli*).

Die Methoden von *Cauchy, Transon, Borchardt* hat *G. v. Escherich* auf Gleichungssysteme ausgedehnt.

Es seien

$$F_1(x) = 0, \quad F_2(y) = 0, \dots$$

die Endgleichungen vom Grade n , die sich aus den Gleichungen

$$f_i(x, y, \dots) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, k)$$

durch Elimination von je $k-1$ der Grössen x, y, \dots ergeben. Ferner sei $D(x, y, \dots)$ die Funktionaldeterminante [I B 1 b, Nr. 21] der Funktionen $f_i(x, y, \dots)$. Die Funktion $\Phi(x, y, \dots)$ werde durch die Gleichung definiert:

$$\frac{\Phi(x, y, \dots)}{F_1(x) F_2(y) \dots} = \sum_{i=1}^n D(x_i, y_i, \dots) \frac{1}{(x - x_i)(y - y_i) \dots}$$

Dann ergibt sich die „einförmige“ Funktion $\sum_i \Psi(x_i, y_i, \dots)$ als Koeffizient von $\frac{1}{xy \dots}$ in der Entwicklung von:

$$\frac{\Psi(x, y, \dots) \Phi(x, y, \dots) D(x, y, \dots)}{F_1(x) F_2(y) \dots}$$

Um den Wert der „zweiförmigen“ Funktion

$$\sum_{i, h} \Psi(x_i, y_i, \dots; x_h, y_h, \dots) \quad \left(\begin{matrix} i, h = 1, 2, \dots, n \\ i \leq h \end{matrix} \right)$$

zu finden, nehme man den Koeffizienten $\psi(x_i, y_i, \dots)$ von $\frac{1}{xy \dots}$ in der Entwicklung von

$$\Psi(x_i, y_i, \dots; x, y, \dots) \left\{ \frac{\Phi(x, y, \dots) D(x, y, \dots)}{F_1(x) F_2(y) \dots} - \frac{1}{D(x_i, y_i, \dots) (x - x_i) (y - y_i) \dots} \right\};$$

derselbe ist gleich

$$\sum_h \Psi(x_i, y_i, \dots, x_h, y_h, \dots), \quad \left(\begin{matrix} h = 1, 2, \dots, n \\ h \neq i \end{matrix} \right)$$

und die gesuchte Funktion ist der Koeffizient von $\frac{1}{xy \dots}$ in der Entwicklung von

$$\frac{\psi(x, y, \dots) \Phi(x, y, \dots) D(x, y, \dots)}{F_1(x) F_2(y) \dots}$$

u. s. w.

Eine erzeugende Funktion für die symmetrischen Funktionen der Grössensysteme

$$x_i, y_i, \dots \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

ist offenbar:

$$\sum \frac{1}{(u_1 - x_i) (v_1 - y_i) \dots (u_2 - x_k) (v_2 - y_k) \dots},$$

zu summieren über alle Permutationen der Systeme

$$u_i, v_i, \dots \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Den Wert dieser erzeugenden Funktion findet *von Escherisch* gleich:

$$\frac{D(u_1, v_1, \dots) D(u_2, v_2, \dots) \dots \Phi(u_1, v_1, \dots) \Phi(u_2, v_2, \dots) \dots D(u_1, u_2, \dots)}{F_1(u_1) F_1(u_2) \dots F_2(v_1) F_2(v_2) \dots D(x_1, x_2, \dots)} \quad 49)$$

25. Symmetrische Funktionen von Reihen von Variabeln, die von einander unabhängig sind. Sätze, Formeln, Verfahren von Mertens, Waring, Schläfli, Mac Mahon, Junker. Will man dagegen die einförmigen Funktionen durch die elementaren:

$$\sum x_1 x_2 \dots x_p y_{p+1} \dots y_{p+q} \dots = c_{pq} \dots$$

ausdrücken, so hat man nur die Newton'schen oder die Girard'schen Formeln auf die Potenzsummen und Koeffizienten der Gleichung für

$$t = ux + vy + \dots$$

anzuwenden und die Koeffizienten der einzelnen Glieder $u^p v^q \dots$ zu annullieren. So erhält man z. B.

$$s_{100..} = c_{100..}$$

$$s_{200..} = c_{100..}^2 - 2c_{200..}$$

$$s_{1100..} = c_{100..}c_{0100..} - c_{1100..}$$

$$2s_{11100..} = c_{11100..} - c_{0010..}c_{1100..} - c_{0100..}c_{10100..} - c_{100..}c_{01000..} \\ + 2c_{100..}c_{0100..}c_{00100..},$$

allgemein:

$$(-1)^{p+q+\dots-1} \frac{(p+q+\dots-1)!}{p!q!\dots} s_{pq..} \\ = \sum (-1)^{\sum \pi_i - 1} \frac{(\sum \pi_i - 1)!}{\pi_1! \pi_2! \dots} c_{\lambda_1 \lambda_1..}^{\pi_1} c_{\lambda_2 \lambda_2..}^{\pi_2} \dots$$

und umgekehrt:

$$(-1)^{p+q+\dots-1} c_{pq..} \\ = \sum \left(\frac{(\lambda_1 + \lambda_1 + \dots - 1)!}{\lambda_1! \lambda_1! \dots} \right)^{\pi_1} \left(\frac{(\lambda_2 + \lambda_2 + \dots - 1)!}{\lambda_2! \lambda_2! \dots} \right)^{\pi_2} \dots \frac{(-1)^i}{\pi_1! \pi_2! \dots} s_{\lambda_1 \lambda_1..}^{\pi_1} s_{\lambda_2 \lambda_2..}^{\pi_2} \dots$$

(*Mac Mahon*). Die Summationen beziehen sich auf alle Glieder, deren „Partialgewichte“

$$\pi_1 \lambda_1 + \pi_2 \lambda_2 + \dots$$

$$\pi_1 \lambda_1 + \pi_2 \lambda_2 + \dots$$

bzw. die Werte p, q, \dots haben. So erhält man den Satz: Jede symmetrische Funktion eines Grössensystems ist rationale Funktion der elementaren Funktionen des Systems.

Kürzer als der angegebene Weg ist die Methode der unbestimmten Koeffizienten. Da nämlich jede eintypige Funktion isobar in allen Partialgewichten ist (*L. Schläfli, F. Betti*), kann man die litterale Form einer eintypigen Funktion als Funktion der elementaren aufstellen. Die Koeffizienten bestimmt man dann aus einer hinreichenden Anzahl spezieller Wertsysteme oder durch Koeffizientenvergleichung der eintypigen Funktionen, nachdem man die elementaren Funktionen durch $x_1, y_1, \dots, x_2, y_2, \dots$ ausgedrückt hat.

Mac Mahon hat seine „neue Theorie“ [Nr. 10] auch auf symmetrische Funktionen von Grössensystemen ausgedehnt. An die Stelle der Partitionen des Gewichts tritt ein System von Partitionen der Partialgewichte:

$$p = p_1 + p_2 + \dots$$

$$q = q_1 + q_2 + \dots$$

:

welche man symbolisch zusammenfasse in

$$pq \dots = p_1 q_1 \dots + p_2 q_2 \dots + \dots$$

Dann ist die symmetrische Funktion $\left(\sum_i p_{1i} q_{1i} \dots, \sum_i p_{2i} q_{2i} \dots \right)$ ausdrückbar als lineares Aggregat der Separationen von

$$(\overline{p_{11} q_{11} \dots}, \overline{p_{12} q_{12} \dots}, \dots, \overline{p_{21} q_{21} \dots}, \overline{p_{22} q_{22} \dots}, \dots)$$

und die Koeffizienten befolgen ein analoges Symmetriengesetz wie im Falle $k = 1$. Insbesondere ist:

$$\begin{aligned} & (-1)^{\sum_i \pi_i - 1} \frac{\left(\sum_i \pi_i - 1\right)!}{\pi_1! \pi_2! \dots} s(\overline{p_1 q_1 \dots} \overline{p_2 q_2 \dots} \dots) \\ &= \sum (-1)^i \frac{\left(\sum_i j_i - 1\right)!}{j_1! j_2! \dots} (J_1)^{j_1} (J_2)^{j_2} \dots \end{aligned}$$

und umgekehrt:

$$\begin{aligned} & (-1)^{\sum_i \pi_i - 1} (\overline{p_1 q_1 \dots} \overline{p_2 q_2 \dots} \dots) \\ &= \sum (-1)^i \frac{\left(\sum_i \pi_{1i} - 1\right)! \left(\sum_i \pi_{2i} - 1\right)! \dots}{j_1! j_2! \dots \pi_{11}! \pi_{12}! \dots \pi_{21}! \pi_{22}! \dots} s(\overline{p_{11} q_{11} \dots} \overline{p_{12} q_{12} \dots} \dots) s(\overline{p_{21} q_{21} \dots} \overline{p_{22} q_{22} \dots} \dots) \dots \end{aligned}$$

Hier bedeutet $s(\overline{p_1 q_1 \dots} \overline{p_2 q_2 \dots} \dots)$ den Ausdruck von $s_{p, q}$, wo

$$p = \pi_1 p_1 + \pi_2 p_2 + \dots, q = \pi_1 q_1 + \pi_2 q_2 + \dots, \dots$$

durch die Separationen von $(\overline{p_1 q_1 \dots} \overline{p_2 q_2 \dots} \dots)$ und die Summation bezieht sich in der ersten Formel auf alle Separationen $(J_1)^{j_1} (J_2)^{j_2} \dots$ von $(\overline{p_1 q_1 \dots} \overline{p_2 q_2 \dots} \dots)$, in der zweiten auf alle Separationen

$$(\overline{p_{11} q_{11} \dots} \overline{p_{12} q_{12} \dots} \dots)^{j_1} (\overline{p_{21} q_{21} \dots} \overline{p_{22} q_{22} \dots} \dots)^{j_2} \dots$$

von $(\overline{p_1 q_1 \dots} \overline{p_2 q_2 \dots} \dots)$. Die Separationen lassen sich analog wie im Falle $k = 1$ in Gruppen zusammenfassen und es besteht der Satz Im Ausdruck der symmetrischen Funktion $(\overline{p_1 q_1 \dots} \overline{p_2 q_2 \dots} \dots)$ durch Separationen von $(\overline{a_1 b_1 \dots} \overline{a_2 b_2 \dots} \dots)$ ist die Koeffizientensumme in jeder Gruppe Null, wenn die Partition $(\overline{p_1 q_1 \dots} \overline{p_2 q_2 \dots} \dots)$ keine Separation der Spezialpartition (Spezifikation) $(\overline{a_1 a_1, a_1 b_1, \dots, a_2 a_2, a_2 b_2, \dots})$ besitzt⁴⁹).

26. Relationen zwischen den elementar-symmetrischen Funktionen: Brill und Junker. Auf einen wesentlichen Unterschied in

49) *F. Mertens*, Wien. Ber. 81², 1880, p. 988; *Krak. Ak.* 17, 1890, p. 143; (2) 1, 1891, p. 333; *S. D. Poisson*, J. éc. pol. 4, an X, cah. 11, p. 199; *E. Hess*, Zeitschr. f. Math. u. Phys. 15, 1870, p. 326; *Schläfli*, Wien. Ber., math.-nat. Kl. 4², 1852, p. 1; *Cayley*, Lond. Trans. 147, 1857, p. 717 = Pap. 2, p. 454; *Mac Mahon*, ebenda 181 A, 1890, p. 481; *E. Betti*, Ann. mat. fis. 4, 1853; *G. v. Escherich*, Wien. Ber., math.-nat. Kl. 36², 1876, p. 251; *A. Brill*, Gött. Nachr. 1893, p. 757; *Fr. Junker*, Über alg. Korrespondenzen, Diss. Tübingen 1889; Math. Ann. 38, 1891, p. 91; 43, 1893, p. 225; 45, 1894, p. 1.

der Theorie der symmetrischen Funktionen für $k=1$ und $k>1$ scheint zuerst *Schläfli* aufmerksam gemacht zu haben. Während im ersten Fall die Anzahl der elementaren Funktionen mit der der Variablen übereinstimmt, sind im zweiten Fall weniger Variable als elementar-symmetrische Funktionen vorhanden, die letzteren also durch eine Anzahl identischer Relationen verbunden.

Unter den elementaren Funktionen bilden die folgenden kn :

$$\begin{array}{ccccccc} c_{100\dots}, & c_{200\dots}, & c_{300\dots}, & \dots, & c_{n00\dots} \\ c_{010\dots}, & c_{110\dots}, & c_{210\dots}, & \dots, & c_{n-1,10\dots} \\ c_{0010\dots}, & c_{1010\dots}, & c_{2010\dots}, & \dots, & c_{n-1,010\dots} \\ c_{00010\dots}, & c_{10010\dots}, & c_{20010\dots}, & \dots, & c_{n-1,0010\dots} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \end{array}$$

ein Fundamentalsystem, da jede symmetrische Funktion durch die Gleichungen:

$$\begin{aligned} y f'(x) &= \sum_i y_i \frac{f(x)}{x-x_i} = c_{010\dots} x^{n-1} - c_{110\dots} x^{n-2} + \dots \\ z f'(x) &= \sum_i z_i \frac{f(x)}{x-x_i} = c_{0010\dots} x^{n-1} - c_{1010\dots} x^{n-2} + \dots \\ &\vdots \end{aligned}$$

auf eine symmetrische Funktion von x_1, x_2, \dots, x_n , und durch die Gleichung:

$$f(x) = x^n - c_{100\dots} x^{n-1} + c_{200\dots} x^{n-2} - \dots = 0$$

auf einen von den x freien Ausdruck reduziert wird, der nur von den obigen kn Grössen abhängt. Insbesondere entstehen durch die Darstellung der übrigen c durch die angegebenen $\binom{n+k}{k} - kn - 1$ rationale Relationen unter den elementaren symmetrischen Funktionen. Diese sind von einander unabhängig und alle überhaupt vorhandenen Relationen sind durch sie rational darstellbar (*Netto*).

Auf anderem Wege hat *Brill* ein vollständiges Relationensystem aufgestellt. Es sei $k=2$. Setzt man

$$t_i = ux_i + vy_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

so wird

$$\begin{aligned} \sum t_i &= c_{10} u + c_{01} v, \\ \sum t_{i_1} t_{i_2} &= c_{20} u^2 + c_{11} uv + c_{02} v^2 \\ &\vdots \end{aligned}$$

und die Bedingungen dafür, dass die Grössen c_{ik} die elementaren symmetrischen Funktionen der n Grössenpaare $x_1, y_1, x_2, y_2, \dots$ sind, müssen übereinstimmen mit den Bedingungen dafür, dass die Ternärform

$$\sum c_{ik} (-t)^{n-i-k} u^i v^k$$

in Linearfaktoren zerfällt [I B 1 b, Nr. 5]. Die Bedingungen hierfür bestehen in dem identischen Verschwinden der Formen:

$$\binom{p}{p} (\sum t_i^\alpha, \sum t_{i_1} t_{i_2} \dots t_{i_p})_p \\ - \binom{p+1}{p} (\sum t_i^{\alpha-1}, \sum t_{i_1} t_{i_2} \dots t_{i_{p+1}})_p \dots (-1)^{n-p} \binom{n}{p} (\sum t_i^{\alpha-n+p}, t_1 t_2 \dots t_n)_p$$

($\alpha > p$); hierin bedeutet $(P, Q)_p$ die p^{te} Überschiebung [I B 2, Nr. 14] der Formen P und Q , und die Funktionen der t sind durch die Koeffizienten der Form $\sum c_{ik} (-t)^{n-i-k} u^i v^k$, also als Formen von u und v auszudrücken. Setzt man zur Abkürzung

$$\begin{aligned} c_{10}u + c_{01}v &= f_1, \\ c_{20}u^2 + c_{11}uv + c_{02}v^2 &= f_2, \\ &\vdots \end{aligned}$$

so ergibt sich für $n=2$ als Bedingung das Verschwinden der Invariante:

$$(f_1^2 - 2f_2, f_2)_2;$$

für $n=3$ das identische Verschwinden der Covarianten:

$$\begin{aligned} (f_1^3 - 3f_1f_2 + 3f_3, f_2)_2 - 3(f_1^2 - 2f_2, f_3)_2 &= 0, \\ (f_1^4 - 4f_1^3f_2 + 2f_2^3 + 4f_1f_3, f_2)_2 - 3(f_1^3 - 3f_1f_2 + 3f_3, f_3)_2 &= 0 \end{aligned}$$

u. s. w.

Am ausführlichsten hat diese Relationen *Junker* behandelt. Er erhält dieselben z. B. folgendermassen: Entwickelt man die symmetrische Funktion

$$\varphi(x, y, \dots) = \sum (x - x_1)^{\alpha_1} (y - y_1)^{\beta_1} \dots (x - x_2)^{\alpha_2} (y - y_2)^{\beta_2} \dots$$

nach Potenzen der x, y, \dots :

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, \dots) &= \varphi(0, 0, \dots) - \left(x \sum \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} + y \sum \frac{\partial \varphi}{\partial y_i} + \dots \right) \\ &\quad + \frac{1}{2!} \left(x^2 \sum \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} + 2xy \sum \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial y_i} + y^2 \sum \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y_i^2} \right), \\ &\quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \end{aligned}$$

so ergibt sich, wegen $\sum \varphi(x_i, y_i, \dots) = 0$, die Relation:

$$0 = n\varphi(0, 0, \dots) - \left(\sum x_i \cdot \sum \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} + \sum y_i \sum \frac{\partial \varphi}{\partial y_i} \right) + \dots,$$

in der man $\sum x_i = c_{100\dots}$, $\sum y_i = c_{010\dots}$, u. s. w. und

$$\sum \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} = \sum \frac{\partial \varphi}{\partial c_{pq\dots}} \cdot (n - p + 1) c_{p-1, q, \dots} \text{ u. s. w.}$$

zu setzen hat.

Junker zeigt ferner, dass das niedrigste Gewicht für diese Relationen $n + 2$ ist. Daraus folgt insbesondere, dass es Relationen, die für jeden Wert von n gültig sind, nicht geben kann. Bei unbestimmtem n giebt es daher keine Relationen zwischen den elementaren symmetrischen Funktionen, sodass sich in diesem Falle jede symmetrische Funktion nur auf eine Art durch die elementaren darstellen lässt. Diese Darstellung braucht bei einer ganzzahligen Funktion nicht notwendig ganzzahlig zu sein, wie z. B. aus der verallgemeinerten Girard'schen Formel hervorgeht.

Aus jeder Relation zwischen symmetrischen Funktionen lassen sich nach *Junker* neue herleiten, indem man folgende Prozesse anwendet. Durch eine Substitution der Art:

$$x = x' x'' x''' \dots$$

$$y = y' y'' y''' \dots$$

wird eine Funktion in eine andere von mehr Reihen von Grössen verwandelt. Die elementaren Funktionen gehen dadurch in elementare Funktionen der neuen Grössen über.

Durch Koincidenz mehrerer Reihen, z. B.

$$x_i = y_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

wird eine Funktion in eine andere von weniger Reihen von Grössen verwandelt. Die einförmigen Funktionen bleiben einförmig.

Beide Prozesse, nebst den Beziehungen zwischen den einförmigen und den elementaren Funktionen genügen offenbar, um aus den Ausdrücken der primitiven Elementarfunktionen:

$$\sum x_1 y_2 = s_{100..} s_{010..} - s_{110..}$$

$$\sum x_1 y_2 z_3 = s_{100..} s_{010..} s_{0010..} - \dots + 2 s_{1110..}$$

successive die Ausdrücke aller eintypigen symmetrischen Funktionen zu erhalten.

Andere derartige Prozesse sind die Differentialoperatoren:

$$\sum_i \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} = \sum_{p, q, \dots} \frac{\partial \varphi}{\partial c_{p q \dots}} (n - p + 1) c_{p-1, q, \dots} = \sum_{p, q, \dots} \frac{\partial \varphi}{\partial c_{p q \dots}} p s_{p-1, q, \dots},$$

$$\sum_i y_i \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} = \sum_{p, q, \dots} (1 + p) \frac{\partial \varphi}{\partial c_{p q \dots}} c_{p-1, q, \dots} = \sum_{p, q, \dots} p \frac{\partial \varphi}{\partial c_{p q \dots}} s_{p-1, q, \dots}.$$

Die letzteren können z. B. dazu dienen, aus dem Ausdruck einer eintypigen Funktion durch die elementaren oder die einförmigen Funktionen den Ausdruck jeder anderen eintypigen Funktion von demselben Totalgewicht abzuleiten.

Die Mehrdeutigkeit in der Darstellung einer eintypigen Funktion

durch die elementaren macht die Einführung einer „kanonischen“ Form erforderlich. *Junker* definiert als solche diejenige Form einer h -förmigen Funktion, in welcher die h -förmigen Elementarfunktionen im höchstmöglichen Grad homogen auftreten. Er lehrt die kanonische Form herzustellen und beweist, dass der Grad, in welchem die h -förmigen Elementarfunktionen auftreten, dem kleinsten Teilgewicht höchstens gleich sein kann. Unter Teilgewicht der Funktion $\sum x_1^{\alpha_1} y_1^{\beta_1} \dots x_2^{\alpha_2} y_2^{\beta_2} \dots$ versteht *Junker* die Summen

$$\begin{aligned} \alpha_1 + \beta_1 + \dots \\ \alpha_2 + \beta_2 + \dots \\ \vdots \end{aligned}$$

während er die Partialgewichte als „Reihengewichte“ bezeichnet⁴⁹⁾.

27. Allgemeinere Funktionen. *Junker* macht auf eine neue Art von Funktionen, doppelsymmetrische Funktionen, aufmerksam; dieselben sind nicht nur symmetrisch in Bezug auf die Vertauschungen von Kolonnen, sondern auch in Bezug auf diejenige der Reihen⁴⁹⁾.

Ähnlich spricht *Muir*⁵⁰⁾ von symmetrisch-alternierenden Funktionen. Determinanten sind alternierend-alternierende Funktionen. Allgemeinere Funktionen dieser Art sind bisher nicht betrachtet worden. Auch ist die Untersuchung derselben in einer erschöpfenden Behandlung der Funktionen einer Grössenreihe mit enthalten.

50) *Th. Muir*, Edinb. Trans. 33, 1887, p. 309.

IB 3 c, d. GALOIS'SCHE THEORIE MIT ANWENDUNGEN.

VON

O. HÖLDER

IN LEIPZIG.

Inhaltsübersicht.

1. Einleitung.
 2. Definition der Gruppe einer Gleichung.
 3. Weitere Eigenschaften der Gruppe.
 4. Wirkliche Herstellung der Gruppe.
 5. Monodromiegruppe.
 6. Transitivität und Primitivität.
 7. Adjunktion einer natürlichen Irrationalität.
 8. Cyclische Gleichungen.
 9. Reine Gleichungen.
 10. Zerlegung des Gleichungsproblems durch Resolventenbildung.
 11. Adjunktion einer accessorischen Irrationalität.
 12. Adjunktion eines Radikals.
 13. Begriff der Auflösung.
 14. Kriterium der Auflösbarkeit.
 15. Behandlung nichtauflösbarer Gleichungen.
 16. Allgemeine Gleichungen.
 17. Gleichungen der ersten vier Grade.
 18. Nichtauflösbarkeit der allgemeinen Gleichungen höherer Grade.
 19. Gleichungen mit regulärer Gruppe.
 20. Gleichungen mit commutativer Gruppe.
 21. *Abel'sche* Gleichungen.
 22. Kreisteilungsgleichungen.
 23. Teilungs- und Transformationsgleichungen der elliptischen Funktionen.
 24. Reduktion von Gleichungen auf Normalformen.
 25. Irreducible Gleichungen von Primzahlgrad.
 26. *Sylow'sche* Gleichungen.
 27. Casus irreducibilis der kubischen Gleichung.
 28. Konstruktionen mit Zirkel und Lineal.
 29. Geometrische Gleichungen.
-

Lehrbücher.

- J. A. Serret*, Cours d'algèbre supérieure, Paris, 3. éd. 1866, 4. éd. 1879, 5. éd. 1885 (t. 2, section 5, chap. 5); deutsch v. Wertheim, Leipzig 1868, 2. Aufl. 1878.
C. Jordan, Traité des substitutions et des équations algébriques, Paris 1870.
J. Petersen, de algebraiske ligningers theori, Kjöbenhavn 1877; deutsch 1878 (p. 299 ff.); ital. von *G. Rozzolino* u. *G. Sforza*, Napoli 1891; franz. 1896.
E. Netto, Substitutionentheorie und ihre Anwendung auf die Algebra, Leipzig 1882; ital. v. *G. Battaglini*, Torino 1885; engl. v. *F. N. Cole*, Ann Arbor 1892.
H. Vogt, Leçons sur la résolution algébrique des équations, Paris 1895.
H. Weber, Lehrbuch der Algebra, Braunschweig 1. Bd. 1895, 2. Bd. 1896 (besonders Bd. 1, drittes Buch); zweite Aufl. 1. Bd., 1898.

1. **Einleitung.** *Évariste Galois* hat eine Theorie der Gleichungen geschaffen¹⁾, die ein Kriterium für die Auflösbarkeit spezieller Gleichungen durch Wurzelzeichen ergibt, aber zugleich weit über dieses Ziel hinausführt. Diese Theorie knüpft an den Begriff der Irreducibilität an.

Eine Gleichung $f(x) = 0$ wird *reducibel* genannt, wenn die ganze Funktion $f(x)$, welche die linke Seite bildet, so in Faktoren gespalten werden kann, dass die Koeffizienten der Faktoren „rational bekannt“ sind; im andern Fall heisst die Gleichung *irreducibel* [I B 1 a, Nr. 10]. Die Eigenschaft der Irreducibilität kommt also einer Gleichung nur mit Rücksicht auf eine vorher zu machende Festsetzung zu. Man hat gewisse Grössen R, R', \dots zu bezeichnen, die als rational bekannt angesehen werden sollen. Zugleich sind auch diejenigen Grössen als rational bekannt zu betrachten, die sich aus R, R', \dots mit Hülfe der Operationen der Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division ergeben. Alle diese Grössen bilden den Rationalitätsbereich $[R, R', \dots]$.²⁾ Die Grössen R, R', \dots können bis auf einen gewissen Grad willkür-

1) Oeuvres mathématiques d'*Évariste Galois*, Abdruck aus J. d. math. 11 (1846), p. 381; neu hsg. von *É. Picard*, Par. 1897; deutsche Ausg. von *Maser*, Berlin 1889. Die wichtigste Arbeit p. 33, die vor 1846 nicht gedruckt war, ist im Jahre 1831 niedergeschrieben. Einige Resultate waren von *Galois* im Bulletin des sciences mathém. von *Férussac* 13 (1830), p. 271 veröffentlicht worden. Besonders bemerkenswert ist auch p. 24 der oeuvres, der Brief an *Chevalier*, der nach *Galois'* Tod 1832 in der Revue encyclopédique erschien.

2) Vgl. *L. Kronecker*, Grundzüge einer arithmetischen Theorie der algebraischen Grössen, Berlin 1882, p. 3 (J. f. M. 92 [1882]) = Werke 2, p. 250. Vgl. auch *Galois*, mém. sur les cond. de resol., principes: „on pourra convenir de regarder“ etc.; *N. H. Abel*, Bd. 1, p. 479 Fussn.; 2, p. 220, Z. 3 v. o.; p. 330, Z. 24 v. o. Andere Autoren nennen eine solche Gesamtheit von Grössen einen „Körper“; vgl. *R. Dedekind's* 11. Supplement zu den Vorlesungen von *P. G. Lejeune-Dirichlet* über Zahlentheorie, 3. Aufl. 1879 [I B 1 c, Nr. 2].

lich angenommen werden, es müssen nur die Koeffizienten von $f(x)$ selbst dem Rationalitätsbereich angehören. Der einfachste Rationalitätsbereich ist der „absolute“, der nur aus den rationalen Zahlen besteht.

Wenn die Gleichung $g(x) = 0$ für eine Wurzel der irreducibeln Gleichung $f(x) = 0$ erfüllt ist, so ist $g = 0$ erfüllt für alle Wurzeln der irreducibeln Gleichung³⁾. Voraussetzung ist dabei, dass ein Rationalitätsbereich zu Grunde liegt, dem die Koeffizienten der beiden Gleichungen angehören, und in dem die zweite Gleichung irreducibel ist. Der genannte Satz besagt, dass *in gewissem Sinn* von jeder Wurzel einer irreducibeln Gleichung ausgesagt werden kann, was von einer Wurzel gilt. Anders verhält sich die Sache, wenn man Paare von Wurzeln betrachtet. Es hat z. B. die im absoluten Rationalitätsbereich irreducible Gleichung $x^4 + x^3 + x^2 + x + 1 = 0$ die Wurzeln

$x_1 = e^{\frac{2\pi i}{5}}, x_2 = e^{\frac{4\pi i}{5}}, x_3 = e^{\frac{8\pi i}{5}}, x_4 = e^{\frac{6\pi i}{5}}$, und es besteht die Relation $x_1^2 - x_2 = 0$. Diese Relation würde nicht bestehen bleiben, wenn wir für das Wurzelpaar x_1, x_2 das Paar x_3, x_1 setzen wollten, dagegen ist

$$(1) \quad x_2^2 - x_3 = 0, \quad x_3^2 - x_4 = 0, \quad x_4^2 - x_1 = 0.$$

Es gilt also nicht für jedes Wurzelpaar, was für ein Wurzelpaar gilt. Ähnliches findet man, wenn man Relationen aus Wurzeltripeln bildet. So ist

$$(2) \quad x_1 - x_2 x_3 = 0, \quad x_2 - x_3 x_4 = 0, \quad x_3 - x_4 x_1 = 0, \quad x_4 - x_1 x_2 = 0,$$

während der Ausdruck $x_2 - x_1 x_3$ einen von Null verschiedenen Wert hat.

Die Relationen (1) gehen durch die cyklische Vertauschung $(x_1 x_2 x_3 x_4)$ [I A 6, Nr. 3] aus einander hervor, und es gilt dasselbe von den Relationen (2). Besteht nun *vermöge der speziellen Werte* der Grössen x_1, x_2, x_3, x_4 irgend eine Relation $\varphi(x_1, x_2, x_3, x_4) = 0$, in welche ausserdem nur noch Grössen des Rationalitätsbereichs als Koeffizienten eingehen, so lässt sich zeigen, dass auch in dieser Relation die Vertauschung (x_1, x_2, x_3, x_4) ausgeführt werden darf, ohne dass die Relation aufhört, zu bestehen; dagegen giebt es ausser den Wiederholungen (Potenzen) des genannten Cyklus keine Substitution, die in allen Relationen $\varphi = 0$ der genannten Art ausgeführt werden dürfte.

So ergiebt sich eine aus den Potenzen der Substitution $(x_1 x_2 x_3 x_4)$ gebildete Gruppe⁴⁾, welche der vorgelegten Gleichung zugehört.

Galois hat nun die Entdeckung gemacht, dass in dieser Weis-

3) *N. H. Abel*, J. f. M. 4 (1829), p. 131, *oeuvre. nouv. éd. publ. par L. Sylow* et *S. Lie* (1881) 1, p. 480.

4) Vgl. Anm. 11.

jeder speziellen Gleichung, nachdem ein Rationalitätsbereich zu Grunde gelegt ist, eine völlig bestimmte Gruppe von Substitutionen zugehört⁵⁾. Aus der „Galois'schen Gruppe einer Gleichung“ kann man die wesentlichsten Eigenschaften der Gleichung erkennen. Von Gleichungen, welche dieselbe Gruppe besitzen, sagt man, dass sie den gleichen „Affekt“ haben⁶⁾ [I B 3 b, Nr. 20].

Einen Keim der Galois'schen Theorie kann man bei *Lagrange* finden. Dieser knüpft an die Betrachtungen an, welche *Hudde* und *Waring* über solche Gleichungen angestellt hatten, in welchen zwischen den Wurzeln gewisse einfache Relationen bestehen⁷⁾. *Lagrange* denkt sich an jener bemerkenswerten Stelle eine Relation, welche zwischen einem Teil der Wurzeln vermöge der numerischen Werte dieser Wurzeln besteht, und unterscheidet nun den Fall, in welchem diese Relation „nur für diese Wurzeln und nur auf eine Weise“ statt hat, von dem andern, in welchem in der Relation gewisse Vertauschungen vorgenommen werden können. Die Wichtigkeit der zwischen den Wurzeln bestehenden Relationen trat später noch mehr durch die von *Gauss* über die Kreisteilung⁸⁾ ausgeführten Untersuchungen hervor, auf welche *Galois* auch Bezug genommen hat⁹⁾.

2. Definition der Gruppe einer Gleichung. Die Gleichung $f(x) = 0$ werde vom n^{ten} Grad und ohne Doppelwurzel, dagegen nicht notwendig als irreducibel angenommen. Die Wurzeln x_1, x_2, \dots, x_n der Gleichung sind von einander verschieden. Nun wähle man eine Irrationalität w , in welcher jede der Grössen x_1, x_2, \dots, x_n rational ausgedrückt, und die selbst in allen den Grössen x_1, x_2, \dots, x_n zusammen rational dargestellt werden kann; eine solche Irrationalität lässt sich immer finden, z. B. indem man $w = m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_n x_n$ setzt und m_1, m_2, \dots, m_n als ganze Zahlen so bestimmt, dass die $n!$ Ausdrücke, die aus $m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_n x_n$ durch die sämt-

5) Oeuvr. p. 37.

6) *L. Kronecker*, Berl. Ber. 1858, p. 288 und 1861, p. 615.

7) *J. L. Lagrange*, réflexions sur la résolution algébrique des équations (nouveaux mémoires de l'acad. roy. de Berlin 1770, p. 134 ff., 1771, p. 138 ff.), oeuvr. publ. par *J. A. Serret*, Paris 1869, 3, p. 403 ff. *Johannis Huddenii* epistola prima de reductione aequationum (1657). Dieser Brief ist der Geometria a *Renato Des-Cartes* op. atque stud. *F. a Schooten*, Amstelodami (1. Aufl. 1649, 2. Aufl. 1659, 3. Aufl. 1683) beigedruckt und findet sich in der 3. Aufl. dieser lat. Übersetzung der „Géométrie“ auf S. 401. Man vgl. besonders p. 426. *Ed. Waring*, miscellanea analytica, Cantabrigiae 1762, p. 26.

8) Vgl. Nr. 22.

9) Oeuvr. p. 25.

lichen Vertauschungen der Grössen x entstehen, verschieden sind¹⁰⁾. Drückt man die Wurzeln x in w aus, so erhält man

$$(3) \quad x_1 = \psi_1(w), \quad x_2 = \psi_2(w), \quad \dots \quad x_n = \psi_n(w).$$

Jetzt bedeute $G(x) = 0$ die in dem zu Grunde gelegten Rationalitätsbereich $[R, R', \dots]$ irreducible Gleichung, der die Grösse w genügt, und seien $w, w', w'', \dots w^{(r-1)}$ die sämtlichen Wurzeln der Gleichung $G = 0$. Es gehen nun aus (3) im ganzen r Grössenreihen

$$(4) \quad \psi_1(w^{(\alpha)}), \quad \psi_2(w^{(\alpha)}), \quad \dots \quad \psi_n(w^{(\alpha)}), \quad (\alpha = 0, 1, 2, \dots r-1)$$

hervor, die nichts anderes sind, als r verschiedene Anordnungen (Permutationen) jener selben Wurzeln $x_1, x_2, \dots x_n$. Bedeutet wieder $\varphi(x_1, x_2, \dots x_n) = 0$ eine zwischen den Grössen x vermöge der speziellen Werte dieser Grössen bestehende Relation, deren Koeffizienten dem Rationalitätsbereich $[R, R', \dots]$ angehören, so kann in der Relation $\varphi = 0$ für $x_1, x_2, \dots x_n$ jede der Anordnungen (4) eingesetzt werden, ohne dass die Relation aufhörte, richtig zu sein. Das ist eine Folge des in Nr. 1 erwähnten Satzes. Man darf also in der Gleichung $\varphi(x_1, x_2, \dots x_n) = 0$ alle die in der Formel

$$\begin{pmatrix} \psi_1(w) & \psi_2(w) & \dots & \psi_n(w) \\ \psi_1(w^{(\alpha)}) & \psi_2(w^{(\alpha)}) & \dots & \psi_n(w^{(\alpha)}) \end{pmatrix}$$

für $\alpha = 0, 1, 2, \dots r-1$ enthaltenen r Substitutionen ausführen. Es lässt sich beweisen, dass diese Substitutionen eine *Gruppe* bilden¹¹⁾, und dass eine in dieser Gruppe nicht enthaltene Substitution jedenfalls nicht in *allen* Relationen $\varphi = 0$ ausgeführt werden darf. Die so definierte Gruppe ist, wenn der Rationalitätsbereich $[R, R', \dots]$ zu Grunde gelegt wird, die „Galois'sche Gruppe“ der Gleichung $f(x) = 0$. Die hier angeführten Eigenschaften dieser Gruppe zeigen, dass sie nur durch die Gleichung selbst und durch den Rationalitätsbereich bestimmt und von der zu ihrer Konstruktion benutzten Grösse w unabhängig ist¹²⁾.

10) Galois, *oeuvre*, p. 36.

11) d. h. dass je zwei solche Substitutionen, wenn man sie auf die eine oder die andere Art zusammensetzt, wieder eine solche Substitution ergeben. Galois hat das nicht bewiesen; man vgl. den Beweis bei E. Betti, *Ann. mat. fis.* 3 (1852), p. 87, 88. Hinsichtlich aller gruppentheoretischen Begriffe vgl. man auch I A 6.

12) Eine andere Auffassung der Galois'schen Gruppe einer Gleichung hat L. Kronecker gegeben, Grundzüge einer arithmetischen Theorie der algebraischen Grössen, Berlin 1882, p. 32—34 = Werke 2, p. 281—285. Diese Auffassung ist von A. Kneser, *J. f. Math.* 102 (1888), p. 20 näher ausgeführt worden. Wieder anders hat H. Weber die Gruppe einer Gleichung eingeführt, indem er für die

Die zur Definition der Gruppe benutzte Gleichung $G = 0$ wird als „Galois'sche Resolvente“ der Gleichung $f = 0$ bezeichnet¹³⁾. Der Grad r dieser Resolvente ist gleich der Anzahl der Substitutionen der Galois'schen Gruppe, d. h. gleich der „Ordnung“ dieser Gruppe.

3. Weitere Eigenschaften der Gruppe. Man kann die Eigenschaften der Galois'schen Gruppe einer Gleichung auch etwas anders formulieren. Es sei $\chi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ eine ganze Funktion der Wurzeln x_1, x_2, \dots, x_n der Gleichung, und es soll χ für jede Substitution der Gleichungsgruppe seinen numerischen Wert behalten. Man kann dann den Wert von χ folgendermassen berechnen. Man drücke x_1, x_2, \dots, x_n durch w aus, wodurch $\chi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \omega(w)$ wird. Diejenigen Werte, die aus der Funktion $\chi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ durch die Substitutionen der Gruppe hervorgehen, sind $\omega(w), \omega(w'), \omega(w''), \dots, \omega(w^{(r-1)})$. Diese Werte müssen hier einander gleich sein, und es ist somit

$$\chi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{r} \{ \omega(w) + \omega(w') + \omega(w'') + \dots + \omega(w^{(r-1)}) \}.$$

Die rechte Seite der erhaltenen Gleichung stellt sich als Grösse des Rationalitätsbereichs dar [I B 3 b Nr. 1]. Eine Funktion χ , welche bei den Substitutionen der Gruppe numerisch ungeändert bleibt, hat also einen rational bekannten Wert. Die Umkehrung dieses Satzes ist gleichfalls richtig, was im Grunde schon in Nr. 2 enthalten ist¹⁴⁾.

Ausserdem lässt sich noch beweisen: wenn eine Gruppe Γ von Substitutionen der Wurzeln x_1, x_2, \dots, x_n existiert von der Eigenschaft, dass jede ganze Funktion der Wurzeln, die bei den Substitutionen von Γ numerisch ungeändert bleibt, rational bekannt ist, und jede ganze Funktion der Wurzeln, deren Wert rational bekannt ist, bei den Substitutionen von Γ numerisch ungeändert bleibt, so ist Γ die Galois'sche Gruppe der Gleichung $f(x) = 0$, der die Wurzeln x_1, x_1, \dots, x_n angehören¹⁵⁾.

Die Koeffizienten der Funktionen sind hier stillschweigend als rational bekannt angenommen worden.

sämtlichen Grössen eines „Normalkörpers“ Substitutionen definiert hat, Acta math. 8 (1886), p. 196 u. Lehrbuch der Algebra, 1. Aufl. 1, p. 467 ff., 476 ff.

13) Betti, a. a. O. p. 86.

14) Galois, oeuvr. p. 37.

15) J. A. Serret, Cours d'algèbre 3. éd., 2, p. 612. Man vgl. auch die Behandlung der Galois'schen Fundamentalsätze bei C. Jordan, Math. Ann. 1 (1869), p. 141; J. König, Math. Ann. 14 (1879), p. 212; Th. Söderberg, Acta math. 11 (1888), p. 297; O. Hölder, Math. Ann. 34 (1889), p. 26 u. 454; O. Bolza, Am. J. of math. 13 (1891), p. 1.

4. Wirkliche Herstellung der Gruppe. Will man in einem gegebenen Falle die *Galois'sche* Gruppe rechnerisch aufstellen, so kann man folgendermassen verfahren. Man bilde das Produkt

$$F(x) = \prod_{(i)} (x - u_1 x_{i_1} - u_2 x_{i_2} - \dots - u_n x_{i_n})$$

über alle die $n!$ Permutationen $x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_n}$ der Wurzeln x_1, x_2, \dots . Die Gleichung $F(x) = 0$ hat eine Diskriminante [I B 1 a, Nr. 20], als Funktion von u_1, u_2, \dots, u_n nicht identisch verschwindet. Setzt man jetzt für u_1, u_2, \dots, u_n solche ganze Zahlen m_1, m_2, \dots, m_n , für welche die Diskriminante von Null verschieden ist¹⁶⁾, so erfüllen m_1, m_2, \dots, m_n die in Nr. 2 ausgesprochene Bedingung. Das *Galois'sche* Verfahren kann dann so durchgeführt werden, dass die rationalen Ausdrücke

$$(5) \quad \psi_1(w), \psi_2(w), \dots, \psi_n(w),$$

die x_1, x_2, \dots, x_n in $w = m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_n x_n$ darstellen, wirklich fertig gerechnet werden. Man kann auch die linearen Ausdrücke $m_1 x_{i_1} + m_2 x_{i_2} + \dots + m_n x_{i_n}$ in w berechnen, so dass also

$$m_1 x_{i_1} + m_2 x_{i_2} + \dots + m_n x_{i_n} = \chi_i(w).$$

Die Funktion $F(x)$, deren Koeffizienten nach Einsetzung der Zahlen m_1, m_2, \dots, m_n dem Rationalitätsbereich angehören, ist nun in irreducibeln Faktoren zu zerlegen, was durch eine endliche Zahl Operationen geschehen kann¹⁸⁾. Die Rechnungen, die wir uns vorhergehenden durchgeführt dachten, setzen, wie eine nähere Untersuchung zeigt, noch nichts darüber voraus, welche der Wurzeln vorliegenden speziellen Gleichung $f(x) = 0$ mit x_1 , welche mit x_2 u. bezeichnet sein soll. Man kann deshalb einen beliebigen irreduciblen Faktor $G(x)$ der Funktion $F(x)$ wählen und annehmen, dass w eine Wurzel der Gleichung $G = 0$ sein soll. Von den Ausdrücken χ_i kann man dann diejenigen aussuchen, welche die Gleichung $G = 0$ befriedigen. Diese Ausdrücke $\chi_i(w)$ sind in (5) für w einzusetzen. Dadurch entstehen gewisse Permutationen, die man wirklich mit anderen vergleichen kann und die deshalb die gewünschte *Galois'sche* Gruppe in völlig ausgerechneter Form ergeben¹⁹⁾.

16) Vgl. z. B. *Weber*, Algebra 1. Aufl. 1, p. 457. Vgl. den Satz von *D. Hilbert*, J. f. Math. 110 (1892), p. 104.

17) Oeuvr. p. 36.

18) Die oben genannte epistola *Huddenii* enthält schon eine Methode zur Zerlegung der Gleichungen. Für jeden beliebigen Rationalitätsbereich ist diese Zerlegung von *L. Kronecker* behandelt worden, Grundzüge einer arithmetischen Theorie der algebraischen Grössen, p. 10 ff. Werke 2, p. 256 ff. Vgl. auch *K. Runge*, J. f. Math. 99 (1886), p. 89 [I B 1 a, Nr. 10].

19) Liegt eine Gleichung von 2., 3. oder 4. Grad gegeben vor, so kann die Gruppe in besonders einfacher Weise finden, vgl. *F. Hock*, Diss. Tübingen 1891.

5. Monodromiegruppe. Sind die Koeffizienten einer Gleichung rationale Funktionen einer Variablen ξ (oder auch mehrerer), etwa mit rationalen Zahlkoeffizienten, so sind unter den verschiedenen Arten, wie der Rationalitätsbereich angenommen werden kann, zwei besonders bemerkenswert. Entweder man rechnet zum Rationalitätsbereich nur rationale Funktionen von ξ mit rationalen Koeffizienten, oder man rechnet dazu alle rationalen Funktionen von ξ , gleichviel wie die Koeffizienten dieser Funktionen beschaffen sein mögen; man „adjungiert“ in diesem Fall gewissermassen alle numerischen Grössen. Die Gruppe, welche sich bei der zweiten Annahme ergibt, kann man auch so definieren. Man suche für einen variablen Wert ξ die sämtlichen Wurzeln der Gleichung und setze nun diese Funktionen von ξ gleichzeitig auf demselben Wege fort, indem ξ eine kontinuierliche Reihe komplexer Werte von einem festen Wert ξ_0 bis wieder nach ξ_0 zurück annimmt. Schliesslich werden sich die Wurzeln im allgemeinen vertauscht haben. Alle Vertauschungen, die man so durch Benutzung verschiedener Wege erhalten kann, bilden zusammen die Gruppe, um die es sich handelt. Diese Gruppe wird „*Monodromiegruppe*“ genannt²⁰⁾ zum Unterschied von der „*algebraischen Gruppe*“, die sich bei der ersten Annahme über den Rationalitätsbereich oder auch bei der Adjunktion von nur einigen bestimmten Irrationalitäten ergibt.

Die aus dem Fortsetzungsprinzip sich ergebenden Substitutionen hat zuerst *V. Puiseux* studiert²¹⁾. *Ch. Hermite* hat dann gezeigt, dass die Gesamtheit dieser Substitutionen nichts anderes ist, als — bei einer gewissen Annahme über den Rationalitätsbereich — die *Galois'sche Gruppe* der Gleichung²²⁾. *C. Jordan* hat bewiesen, dass die Monodromiegruppe eine ausgezeichnete [I A 6, Nr. 16] Untergruppe von der algebraischen Gruppe der Gleichung ist²³⁾.

6. Transitivität und Primitivität. Es wurde schon erwähnt, dass die Gleichung $f(x) = 0$ nicht irreducibel zu sein braucht. Wenn sie es ist, und nur dann, ist die Gruppe transitiv²⁴⁾, d. h. es erlauben die Substitutionen der Gruppe, von jedem x_h zu jedem x_i überzugehen; in diesem Falle ist auch die Ordnung der Gruppe durch den Grad der Gleichung teilbar²⁵⁾. Der äusserste Fall der Reducibilität der

20) *C. Jordan*, traité p. 277.

21) *J. d. math.* 15 (1850), p. 365.

22) *Par. C. R.* 1851, 1. sém. p. 458.

23) *Traité* p. 278. Ausgezeichnete Untergruppe vgl. hier Nr. 11.

24) *C. Jordan*, *J. de math.* (2) 12 (1867), p. 111 [I A 6, Nr. 23]; *Math. Ann.* 1 (1869) p. 147 u. traité p. 259.

25) Begriff der Transitivität zuerst bei *P. Ruffini* [I A 6, Nr. 6], der Name

Gleichung ist derjenige, in welchem die Gleichung in lauter Linearfaktoren zerfällt, deren Koeffizienten dem Rationalitätsbereich angehören. In diesem Falle reduziert sich die Gruppe auf die „identische“ Substitution, die jedes x_h durch x_h selbst ersetzt.

Die Gruppen von Buchstabenvertauschungen, welche transitiv sind, werden in primitive und imprimitive eingeteilt²⁶⁾. Eine solche Gruppe heisst „imprimitiv“, wenn man die Buchstaben x_1, x_2, \dots, x_n in Systeme so einteilen kann, dass jede Substitution die Buchstaben eines und desselben Systems wieder in Buchstaben eines einzigen Systems verwandelt. Im andern Falle heisst die Gruppe „primitiv“. Die Gruppe Γ unserer Gleichung n^{ten} Grades ist, wie *H. Weber* gezeigt hat, imprimitiv oder primitiv, je nachdem man aus x_1 und den Grössen des Rationalitätsbereichs eine Irrationalität rational zusammensetzen kann oder nicht, für welche der Grad der im gegebenen Rationalitätsbereich irreducibeln Gleichung > 1 und $< n$ ist²⁷⁾.

7. Adjunktion einer natürlichen Irrationalität. Der Rationalitätsbereich, der bei der Betrachtung einer gegebenen Gleichung zu Grunde gelegt wird, ist noch bis auf einen gewissen Grad willkürlich; er unterliegt nur der einen Bedingung, dass ihm die Koeffizienten der Gleichung angehören. Insbesondere kann also der Rationalitätsbereich durch Zufügung von Irrationalitäten, d. h. durch „Adjunktion“ erweitert werden²⁸⁾. Durch eine solche Adjunktion kann die Gruppe der Gleichung sich ändern.

Zunächst ergibt eine einfache Überlegung, dass jedenfalls alle Substitutionen der neuen Gruppe auch der alten angehören müssen. Tritt also überhaupt eine Änderung ein, so besteht die neue Gruppe aus einem Teil der Substitutionen der alten Gruppe, d. h. die neue Gruppe ist eine „Untergruppe“ der alten [I A 6, Nr. 5.].

Will man die neue Gruppe, die nach der Adjunktion der Gleichung zukommt, berechnen, so kann man wieder dieselbe Irrationalität w wie früher benutzen, um die Wurzeln x_1, x_2, \dots, x_n in ihr auszudrücken. Als *Galois'sche* Resolvente hat man nun die im neuen, erweiterten Rationalitätsbereich irreducible Gleichung $G_1 = 0$ anzuwenden, der w genügt. Man hat also G_1 als einen der irreducibeln Faktoren zu bestimmen, in die nach der Adjunktion $G(x)$ zerfällt.

bei *A. Cauchy*, Par. C. R. 1845, 2. sém. p. 668 (oeuvr. [1] 9, p. 294), hier auch der Satz über die Ordnung der transitiven Gruppe.

26) *C. Jordan*, traité p. 34. Die Sache schon bei *Ruffini* [I A 6, Nr. 6].

27) Algebra 1, p. 483–487.

28) *Galois*, oeuvr. p. 34.

Diese Zerfällung ist wieder durch eine endliche Zahl von Operationen ausführbar.

Die einfachste Adjunktion ist die einer „natürlichen“ Irrationalität. Dies ist eine solche Irrationalität, die sich als ganze Funktion $g(x_1, x_2, \dots x_n)$ der Wurzeln ausdrücken lässt²⁹⁾, wobei die Koeffizienten der Funktion dem Rationalitätsbereich angehören. Nach einer solchen Adjunktion besteht die neue Gruppe Δ aus denjenigen Substitutionen der alten Gruppe Γ , die den Ausdruck $g(x_1, x_2, \dots x_n)$ numerisch nicht ändern³⁰⁾. Dabei ist zu bemerken, dass diejenigen Substitutionen, welche einen gegebenen Ausdruck numerisch nicht ändern, eine Gruppe bilden unter der Voraussetzung, dass man sich auf Substitutionen der Gleichungsgruppe Γ beschränkt³¹⁾. Ohne diese Voraussetzung bilden sie nicht immer eine Gruppe.

Nun seien zwei Funktionen der Wurzeln $g(x_1, x_2, \dots x_n)$ und $g_1(x_1, x_2, \dots x_n)$ gegeben, und es soll die Funktion $g_1(x_1, x_2, \dots x_n)$ ihren numerischen Wert mindestens bei allen den Substitutionen der Gruppe Γ beibehalten, welche die Funktion $g(x_1, x_2, \dots x_n)$ numerisch nicht ändern. In diesem Falle bleibt $g_1(x_1, x_2, \dots x_n)$ numerisch ungeändert bei jeder Substitution der Gruppe Δ , die nach Adjunktion von g der Gleichung zugehört. g_1 ist also eine Grösse des neuen Rationalitätsbereichs, d. h. g_1 setzt sich aus den Grössen des alten Rationalitätsbereichs und aus g rational zusammen. Es gestatten auch hier die früher erwähnten Mittel, bis zur wirklichen Berechnung vorzuschreiten.

Bleibt eine Funktion $g_0(x_1, x_2, \dots x_n)$ numerisch ungeändert bei allen Substitutionen der Gruppe Γ , die mehrere Funktionen $g(x_1, x_2, \dots x_n)$, $g_1(x_1, x_2, \dots x_n)$, $\dots g_\varrho(x_1, x_2, \dots x_n)$ gleichzeitig numerisch nicht ändern, so kann g_0 aus $g, g_1, \dots g_\varrho$ und den Grössen des ursprünglichen Rationalitätsbereichs zusammengesetzt werden.

Diese Sätze sind mit gewissen Sätzen von *Lagrange*, die sich auf Funktionen von Veränderlichen beziehen, analog³²⁾; man kann die *Lagrange'schen* Sätze aus den eben genannten ableiten³³⁾.

29) *L. Kronecker* hat zuerst den Unterschied zwischen diesen Irrationalitäten und anderen betont, Berl. Mon.-Ber. 1861, p. 609; man vgl. dazu *F. Klein*, Vorlesungen über das Ikosaeder etc. Leipzig 1884, p. 157.

30) *Galois*, oeuvr. p. 41; der Beweis ist hier unvollständig, man vgl. dazu *Serret*, Cours d'algèbre 3. éd., 2, p. 625.

31) *C. Jordan*, Math. Ann. 1 (1869), p. 148; traité p. 261.

32) *Lagrange*, oeuvr. 3 (1869), p. 374 ff.; *Klein*, Ikosaeder p. 86.

33) Vgl. Nr. 16. Das Umgekehrte ist schwieriger, man vgl. *Söderberg*, Acta math. 11 (1888), p. 297. Dabei hat man die Ausführungen von *Lagrange*,

8. Cyklische Gleichungen. Wenn die Gruppe der Gleichung $f(x) = 0$ aus den Potenzen des Cyklus $(x_1 x_2 \dots x_n) = S$ besteht³⁴⁾, kann die Gleichung durch Wurzelzeichen aufgelöst werden. Der einfachste Fall ist der, in dem n eine Primzahl ist. Adjungiert man in diesem Falle $\alpha = e^{\frac{2\pi i}{n}}$, so ändert sich die Gruppe (Nr. 11) nicht. Die Funktion

$$g_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1 + \alpha^k x_2 + \alpha^{2k} x_3 + \dots + \alpha^{(n-1)k} x_n,$$

deren Koeffizienten dem so erweiterten Rationalitätsbereich angehören, wird durch die Substitution S in $\alpha^{-k} \cdot g_k$ übergeführt; es wird also g_k^n für die Substitutionen der Gruppe numerisch unveränderlich sein und dem erweiterten Rationalitätsbereich angehören. Somit ergibt sich g_k durch Radizieren. Falls nun k eine Zahl von 1 bis $n-1$ bedeutet, und g_k nicht etwa gleich Null ist, wird g_k durch jede nicht-identische Substitution der Gruppe numerisch geändert. Somit müssen (Nr. 7) x_1, x_2, \dots, x_n sich in g_k, α und den Grössen des alten Rationalitätsbereichs darstellen lassen. Dies geschieht genauer so. Es sei $lk' \equiv 1 \pmod{p}$ [I C 1], dann ist $g_l g_k^{(n-1)k'}$, was auch l bedeuten möge, für die Substitutionen der Gruppe unveränderlich, also in dem erweiterten Rationalitätsbereich enthalten. Man kann so g_l berechnen. Aus den Gleichungen:

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n &= g_0 \\ x_1 + \alpha x_2 + \alpha^2 x_3 + \dots + \alpha^{(n-1)} x_n &= g_1 \\ x_1 + \alpha^2 x_2 + \alpha^4 x_3 + \dots + \alpha^{2(n-1)} x_n &= g_2 \\ x_1 + \alpha^3 x_2 + \alpha^6 x_3 + \dots + \alpha^{3(n-1)} x_n &= g_3 \\ &\dots \dots \dots \end{aligned}$$

kann man dann x_1, x_2, \dots, x_n finden. Die Forderung, dass g_k von Null verschieden sein soll, ist jedenfalls für einen der Indices 1, 2, $\dots, n-1$ erfüllt.

9. Reine Gleichungen. Eine Gleichung von der Form $x^n - a = 0$ wird eine „reine Gleichung“ genannt. Der Rationalitätsbereich muss

hier a enthalten, es soll ihm aber auch $\alpha = e^{\frac{2\pi i}{n}}$ angehören. Die Wurzeln der reinen Gleichung sind

$$x_1 = x, x_2 = \alpha x_1, x_3 = \alpha^2 x_1, \dots, x_n = \alpha^{n-1} x_1.$$

Wenn n eine Primzahl ist, so sind entweder alle Wurzeln

oeuvre. 3, p. 379 ff. zu benutzen; man vgl. auch O. Hölder, Math. Ann. 34 (1889), p. 454.

34) Diese Gleichungen decken sich mit den gewöhnlichen Abel'schen Glei-

Grössen des Rationalitätsbereichs, oder es ist die Gleichung irreduzibel³⁵⁾. Im ersten Falle besteht die Gruppe aus der identischen Substitution allein. Im zweiten Falle kann man die Gruppe bestimmen (Nr. 2), indem man alle Wurzeln in x_1 ausdrückt, so dass also die Gleichung ihre eigene *Galois'sche* Resolvente ist. Die Gruppe besteht dann aus den Potenzen des Cyklus $(x_1 x_2 x_3 \dots x_n)$.

10. Zerlegung des Gleichungsproblems durch Resolventenbildung. Die Bestimmung der Wurzeln der Gleichung $f(x) = 0$ wird oft dadurch vereinfacht, dass man zuerst einen aus den Wurzeln kombinierten Ausdruck bestimmt. Es sei wieder $g_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$ eine ganze Funktion der Wurzeln, deren Koeffizienten dem Rationalitätsbereich angehören. Durch die Substitutionen der *Galois'schen* Gruppe Γ sollen aus g_1 die verschiedenen Werte g_1, g_2, \dots, g_r entstehen, alsdann hat die Gleichung

$$(6) \quad (x - g_1)(x - g_2) \dots (x - g_r) = 0,$$

nachdem sie entwickelt ist, lauter dem Rationalitätsbereich angehörende Koeffizienten. Diese Gleichung wird als „rationale Resolvente“ der Gleichung $f(x) = 0$ bezeichnet. Die *Galois'sche* Gruppe dieser Resolvente wird so bestimmt³⁶⁾: Man führe in der Reihe g_1, g_2, \dots, g_r die Substitutionen der Gruppe Γ aus, wodurch gewisse Anordnungen der Grössen g entstehen. Die Gesamtheit der Substitutionen, welche den Übergang der ursprünglichen Reihenfolge g_1, g_2, \dots, g_r in die neuen Anordnungen darstellen, konstituieren eine transitive Gruppe Γ' . Diese Gruppe gehört der Resolvente an³⁷⁾, und diese ist somit auch irreduzibel (Nr. 6).

Jetzt sollen die sämtlichen Substitutionen von Γ betrachtet werden, die $g_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$ numerisch nicht ändern. Sie bilden eine Gruppe Δ ; auf diese Gruppe Δ reduziert sich die Gleichungsgruppe, wenn man die Grösse g_1 adjungiert. Die Gruppe Δ enthält den ν^{ten} Teil der Substitutionen der Gruppe Γ , was man auch dadurch ausdrückt, dass man sagt, Δ besitze als Untergruppe von Γ den „Index“ ν . Dieser Index ist also gleich der Zahl der numerisch verschiedenen Werte, die aus g_1 entstehen [I A 6, Nr. 5.].

Von besonderer Wichtigkeit ist der Fall, in dem Δ eine „aus-

35) *Abel*, oeuvr. 1, p. 73. *Kronecker*, Berl. Mon.-Ber. 1879, p. 206 nimmt einen allgemeineren Standpunkt ein, indem bei ihm α dem Rationalitätsbereich nicht anzugehören braucht; es ist dann im Falle der Reducibilität der reinen Gleichung eine Wurzel rational bekannt.

36) *Klein*, Ikosaeder p. 88.

37) Der Beweis ergibt sich leicht aus Nr. 3.

gezeichnete“ oder „invariante“ Untergruppe von Γ ist³⁸⁾, und dieser Fall soll allein weiter verfolgt werden. Es seien $T_1, T_2 \dots T_\mu$ die Substitutionen von Δ , so lassen diese in dem nunmehr betrachteten Falle auch $g_2, g_3, \dots g_\nu$ ungeändert.

Man wähle nun die Substitutionen $1, S_1, S_2, \dots S_{\nu-1}$ so aus, dass in der Tabelle der Produkte [I A 6, Nr. 1]:

$$\begin{array}{cccc} T_1 & T_2 & T_3 & \dots T_\mu \\ T_1 S_1 & T_2 S_1 & T_3 S_1 & \dots T_\mu S_1 \\ T_1 S_2 & T_2 S_2 & T_3 S_2 & \dots T_\mu S_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_1 S_{\nu-1} & T_2 S_{\nu-1} & T_3 S_{\nu-1} & \dots T_\mu S_{\nu-1} \end{array}$$

jede Substitution der Gruppe Γ genau einmal enthalten ist. Wenn nun Δ eine *ausgezeichnete* Untergruppe von Γ ist, so gilt folgendes. Wählt man aus der h^{ten} und aus der i^{ten} Horizontalreihe je eine Substitution beliebig aus und multipliziert die erste auf ihrer rechten Seite mit der zweiten, so entsteht eine Substitution einer nur durch h und i bestimmten Horizontalreihe. Man erhält dadurch ein Multiplikationsprinzip von Reihen, durch das eine neue Gruppe definiert wird³⁹⁾, die man mit Γ/Δ bezeichnet.

Die Substitutionen, die in derselben Horizontalreihe stehen, bewirken in dem betrachteten Falle dieselbe Substitution der Grössen $g_1, g_2, \dots g_\nu$, und solche, die in verschiedenen Horizontalreihen stehen, bewirken verschiedene Substitutionen. Es ergiebt sich so, dass die Gruppe Γ/Δ mit der Gruppe Γ' holocedrisch isomorph ist⁴⁰⁾.

Ist der Index ν eine Primzahl, so tritt eine Vereinfachung ein⁴¹⁾. Bedeutet nämlich jetzt S irgend eine Substitution von Γ , die nicht in Δ enthalten ist, so kann die obige Tabelle in die Form

$$\begin{array}{cccc} T_1 & T_2 & T_3 & \dots T_\mu \\ T_1 S & T_2 S & T_3 S & \dots T_\mu S \\ T_1 S^2 & T_2 S^2 & T_3 S^2 & \dots T_\mu S^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_1 S^{\nu-1} & T_2 S^{\nu-1} & T_3 S^{\nu-1} & \dots T_\mu S^{\nu-1} \end{array}$$

gesetzt werden. Die Gruppe Γ/Δ ist nunmehr mit der aus $1, S, S^2, \dots S^{\nu-1}$

38) Vgl. Nr. 11. Man vgl. auch I A 6, Nr. 16.

39) I A 6, Nr. 16; C. Jordan, Par. soc. math. Bull. 1 (1873), p. 48; O. Hölder Math. Ann. 34 (1889), p. 31.

40) I A 6, Nr. 14, die Substitutionen der beiden Gruppen lassen sich eindeutig aufeinander beziehen.

bestehenden Gruppe holoedrisch isomorph und dasselbe muss somit von Γ' gelten. Es ergibt sich in diesem Falle noch, dass Γ' eine cyklische Gruppe⁴²⁾ sein muss, und zwar kann man bei geeigneter Bezeichnung der Grössen g annehmen, dass Γ' aus den Potenzen des Cyklus $(g_1 g_2 \dots g_r)$ besteht.

Die Auflösung der Resolvente geschieht also nach Nr. 8 durch Berechnung der ν^{ten} Einheitswurzeln und eines Radikals mit dem Exponenten ν . Durch Adjunktion einer Wurzel der Resolvente reduziert sich die Gruppe der ursprünglichen Gleichung auf die ausgezeichnete Untergruppe Δ vom Index ν . So oft eine ausgezeichnete Untergruppe vom Primzahlindex vorhanden ist, lässt sich die genannte Vereinfachung vornehmen, weil eine Funktion $g_1(x_1, x_2, \dots x_n)$, die nur für die Substitutionen von Δ unverändert bleibt, sich bilden lässt⁴³⁾.

11. Adjunktion einer accessorischen Irrationalität. Eine Irrationalität, die nicht in der Form $g(x_1, x_2, \dots x_n)$ ausgedrückt werden kann, wird „accessorisch“ genannt⁴⁴⁾. Es sei $F(x) = 0$ die irreducible Gleichung, der die accessorische Irrationalität h genügt und $h, h', \dots h^{(s-1)}$ die Wurzeln dieser Gleichung, d. h. es seien $h', h'', \dots h^{(s-1)}$ die „Konjugierten“ von h [I B 1 c, Nr. 4]. Ist nun Γ die ursprüngliche Gleichungsgruppe, Δ die Gleichungsgruppe nach Adjunktion der einzigen Irrationalität h , Δ' die Gleichungsgruppe nach Adjunktion der einzigen Irrationalität h' u. s. f., so besteht die Reihe $\Delta, \Delta', \dots \Delta^{(s-1)}$ aus den sämtlichen Gruppen, die entstehen, wenn Δ mit den Substitutionen von Γ „transformiert“ wird⁴⁵⁾. In der Reihe $\Delta, \Delta', \dots \Delta^{(s-1)}$ kann eine und dieselbe Gruppe mehrmals auftreten.

Der Index (Nr. 10), der der Gruppe Δ als einer Untergruppe der Gruppe Γ zukommt, ist ein Teiler von dem Grad s der Gleichung $F = 0$.

Ist die Gleichung $F = 0$ so beschaffen, dass von ihren Wurzeln h, h', \dots jede in jeder rational ist, so bedeutet z. B. die Adjunktion

42) Hier soll dies heissen, dass die Grössen g cyklich vertauscht werden; bisweilen wird auch jede Gruppe irgend welcher Operationen cyklich genannt, wenn sie aus den Potenzen einer Operation besteht [I A 6, Nr. 3].

43) J. A. Serret, Cours d'algèbre supérieure, 3^{ème} édit., 2, p. 629—630 C. Jordan, Math. Ann. 1 (1869), p. 143, traité p. 258.

44) Klein, Ikosaeder p. 157.

45) Galois, oeuvr. p. 39, 40; J. A. Serret, Cours d'algèbre, 3. Aufl., 2, p. 619. Man „transformiert“ die Gruppe der Substitutionen T_1, T_2, T_3, \dots mit der Substitution S , indem man $S^{-1}T_1S, S^{-1}T_2S, S^{-1}T_3S, \dots$ bildet, wobei S^{-1} die Umkehrung der Substitution S bedeutet [I A 6, Nr. 3].

von h' dasselbe, wie die Adjunktion von h , und es müssen die Gruppen $\Delta, \Delta', \Delta'', \dots \Delta^{(s-1)}$ sämtlich miteinander identisch sein. Man nennt nun eine Gruppe in einer umfassenderen dann „ausgezeichnet“ enthalten, wenn sie bei allen Transformationen, die man mit Substitutionen der umfassenderen Gruppe ausführen kann, in sich übergeht. Es ist also in dem eben angenommenen Fall Δ eine ausgezeichnete oder „invariante“ Untergruppe von Γ , womit übrigens nicht gesagt sein soll, dass nicht Δ mit Γ zusammenfallen kann.

Adjungiert man einer Gleichung die *sämtlichen* Wurzeln irgend einer Gleichung $F=0$, so kann man statt dessen eine Wurzel der *Galois'schen* Resolvente (Nr. 2) der Gleichung $F=0$ adjungieren, und es liegt dann der eben angenommene besondere Fall vor.

Es sollen nun $f(x)=0$ und $f_0(x)=0$ zwei Gleichungen bedeuten, die beide ohne Doppelwurzeln sind; sie werden in demselben Rationalitätsbereich betrachtet und besitzen beziehungsweise die Gruppen Γ und Γ_0 . Nach der Adjunktion aller Wurzeln der zweiten Gleichung soll die erste die Gruppe Δ , nach Adjunktion aller Wurzeln der ersten die zweite die Gruppe Δ_0 besitzen; es sind dann Δ und Δ_0 ausgezeichnete Untergruppen beziehungsweise von Γ und Γ_0 . Es lässt sich nun folgendes beweisen:

- I. Der Index (Nr. 10), welcher Δ als einer Untergruppe von Γ zukommt, ist gleich demjenigen, der Δ_0 als einer Untergruppe von Γ_0 angehört; er sei gleich m .
- II. Die Gruppen Γ/Δ und Γ_0/Δ_0 sind holodrisch isomorph (Ann. 40)); ihre Ordnung ist m .
- III. Es existiert eine Irrationalität σ , deren Adjunktion gleichzeitig die Gruppe der ersten Gleichung auf Δ und die der zweiten auf Δ_0 reduziert; die irreducible Gleichung, der σ genügt, hat lauter ineinander rationale Wurzeln und eine mit Γ/Δ und Γ_0/Δ_0 holodrisch isomorphe Gruppe⁴⁶⁾; der Grad dieser Gleichung ist gleich m .

Ist die zweite Gleichung „einfach“, d. h. Γ_0 eine „einfache Gruppe“⁴⁷⁾, so kann, falls überhaupt Reduktion eintritt, Δ_0 nur aus der identischen Substitution bestehen. Reduziert sich also die Gruppe einer Gleichung bei der Adjunktion der sämtlichen Wurzeln einer zweiten und zwar einfachen Gleichung, so sind alle Wurzeln dieser

46) *C. Jordan*, Math. Ann. 1 (1869), p. 155, traité p. 269; *P. Bachmann*, Math. Ann. 18 (1881), p. 460; *O. Hölder*, Math. Ann. 34 (1889), p. 47. Man vgl. auch die etwas anderen hierher gehörenden Sätze bei *H. Weber*, Algebra 1, p. 516.

47) d. h. eine solche, die ausser sich selbst und der Identität keine aus-

Gleichung in denen der ersten und den Grössen des ursprünglichen Rationalitätsbereichs rational (Nr. 6)⁴⁸⁾.

Die Gruppe Γ erscheint in gewissem Sinn in die Faktoren Γ/Δ und Δ gespalten, deren erster mit Γ_0/Δ_0 und somit in dem angenommenen besonderen Falle mit Γ_0 holoeidrisch isomorph ist. Wird somit die Gruppe einer Gleichung durch die Adjunktion der sämtlichen Wurzeln einer zweiten Gleichung, die einfach ist, reduziert, so ist die Gruppe der zweiten Gleichung als „Faktorgruppe“ in der Gruppe der ersten enthalten.

12. Adjunktion eines Radikals. Man adjungiere der Gleichung $f(x) = 0$ das Radical $\sqrt[p]{a}$, worunter ein völlig bestimmter von den p Werten dieses Wurzelausdrucks zu verstehen ist. Die Grösse a muss schon vor der Adjunktion dem Rationalitätsbereich angehören, und dasselbe soll von $\alpha = e^{\frac{2\pi i}{p}}$ gelten. p sei eine Primzahl. Das Resultat des letzten Paragraphen lässt sich nun anwenden, indem $f(x) = 0$ die erste und die reine Gleichung $x^p - a = 0$ die zweite Gleichung vorstellt. Wenn das Radical $\sqrt[p]{a}$ die Gruppe Γ der Gleichung $f(x) = 0$ bei der Adjunktion wirklich reduziert, so kann $\sqrt[p]{a}$ nicht dem ursprünglichen Rationalitätsbereich angehören. Dann hat aber (Nr. 9) die reine Gleichung eine cyklische Gruppe p^{ter} Ordnung. Also muss (Nr. 11) Γ , wenn $\sqrt[p]{a}$ adjungiert wird, sich auf eine invariante Untergruppe vom Index p reduzieren. Zugleich ist ersichtlich, dass sich das Radical in den Wurzeln der Gleichung $f(x) = 0$ ausdrücken lässt.

13. Begriff der Auflösung. Unter „Auflösung“ einer Gleichung versteht man gewöhnlich⁴⁹⁾ die Darstellung der Wurzeln der Gleichung durch Radikale, wobei die Radikale beliebig zusammengesetzt und ineinander eingeschachtelt sein können. Nicht jede Gleichung ist auflösbar. Die Berechnung der Wurzeln einer auflösbaren Gleichung besteht, wenn wir nur die irrationalen Rechnungsoperationen hervorheben, darin, dass gewisse Radikale in einer gewissen Reihenfolge

$$\sqrt[p_1]{a_1}, \sqrt[p_2]{a_2}, \dots \sqrt[p_m]{a_m}$$

48) C. Jordan, traité p. 270; dieser Satz entspricht demjenigen, den Abel für auflösbare Gleichungen bewiesen hat (Nr. 18).

49) „Auflösen“ heisst also hier durch *Radikale* auflösen oder, wie man auch sagt, „algebraisch“ auflösen. In allgemeinerem Sinn kann man auch die Reduktion einer Gleichung auf irgend eine Normalform als Auflösung bezeichnen.

berechnet werden. Die Exponenten p_ν der Radikale kann man als Primzahlen annehmen; ferner hat man sich zu denken, dass die Grösse a_ν , die im ν^{ten} Radikal $\sqrt[p_\nu]{a_\nu}$ vorkommt, aus den Grössen des Rationalitätsbereichs und den $\nu - 1$ vorangehenden Radikalen durch die vier Spezies sich berechnen lässt. Aus den sämtlichen m Radikalen und den Grössen des Rationalitätsbereichs kann man dann die Wurzeln der Gleichung rational zusammensetzen.

Man kann die Reihe der Radikale so einrichten, dass für jedes ν die p_ν^{ten} Einheitswurzeln sich aus den ersten $\nu - 1$ Radikalen und den Grössen des Rationalitätsbereichs rational bilden lassen. Hat nämlich die Reihe der Radikale diese besondere Eigenschaft nicht, so hat man zu bedenken, dass nach den Resultaten von Gauss⁵⁰⁾ die Einheitswurzel $e^{\frac{2\pi i}{p_\nu}}$ sich durch Radikale ausdrücken lässt, deren Indices kleiner als p_ν sind; eine genauere Überlegung zeigt dann, dass man durch Einschlebung von Radikalen die erwähnte besondere Eigenschaft herstellen kann.

14. Kriterium der Auflösbarkeit. Es soll jetzt angenommen werden, dass die Reihe der Radikale

$$\sqrt[p_1]{a_1}, \sqrt[p_2]{a_2}, \dots \sqrt[p_m]{a_m}$$

die besprochene besondere Eigenschaft schon besitzt. Man adjungiere nun der aufzulösenden Gleichung das Radikal $\sqrt[p_1]{a_1}$, nachher adjungiere man ausserdem noch $\sqrt[p_2]{a_2}$, dann adjungiere man ausser den beiden ersten Radikalen noch $\sqrt[p_3]{a_3}$ und fahre so fort. Bei jeder neuen Adjunktion kann möglicherweise die Gruppe der Gleichung sich ändern und zwar reduziert sie sich in diesem Falle nach dem Resultat von Nr. 12 auf eine invariante Untergruppe von Primzahlindex. Nachdem das letzte Radikal adjungiert ist, sollen alle Wurzeln x_1, x_2, \dots, x_n durch die vier Spezies berechnet werden können, man hat also dann eine Gruppe, die sich auf die identische Substitution reduziert und mit 1 bezeichnet werden kann (Nr. 6).

Ist Γ die ursprüngliche Gruppe der Gleichung und sind $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots$ die verschiedenen Gruppen, auf welche die successiven Adjunktionen führen, so kommt man zu einer Reihe

$$(7) \quad \Gamma, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{q-1}, 1$$

von Gruppen. Diese Reihe ist eine „Reihe der Zusammensetzung“ für die Gruppe Γ , womit gesagt ist, dass jedes Glied Γ_r der Reihe im vorhergehenden Γ_{r-1} ausgezeichnet enthalten ist, und dass keine Gruppe eingeschaltet werden kann, die umfassender wäre als Γ_r und in Γ_{r-1} ausgezeichnet enthalten und von dieser Gruppe verschieden wäre⁵¹⁾. Der letzte Umstand folgt in unserem Falle daraus, dass der Quotient der Ordnungen von Γ_{r-1} und Γ_r eine Primzahl ist.

Die Quotienten der Ordnungen von aufeinanderfolgenden Gruppen einer Reihe der Zusammensetzung werden als „Faktoren der Zusammensetzung“ bezeichnet⁵²⁾. Jede Gruppe hat ein — abgesehen von der Ordnung der Faktoren — völlig bestimmtes Aggregat von Faktoren der Zusammensetzung, das unabhängig ist von der zur Aufsuchung der Faktoren verwendeten Reihe der Zusammensetzung⁵³⁾ [I A 6 Nr. 17.]. So ergibt sich also der Satz, dass für die *Galois'sche* Gruppe einer auflösbaren Gleichung die Faktoren der Zusammensetzung Primzahlen sind. Diese Bedingung ist auch hinreichend, wie sich aus dem Resultat von Nr. 10 ergibt⁵⁴⁾.

Man nennt eine Gruppe von der eben genannten Beschaffenheit auch selbst „auflösbar“ [I A 6, Nr. 23], und es gilt der Satz, dass jede Untergruppe einer auflösbaren Gruppe auflösbar ist⁵⁵⁾. Liegt eine Gruppe vor, so kann über ihre Auflösbarkeit durch eine endliche Zahl von Operationen entschieden werden, es gilt also (Nr. 4) dasselbe, wenn eine Gleichung vorliegt, deren Auflösbarkeit untersucht werden soll.

Die Bedingung der Auflösbarkeit lässt sich noch in verschiedenen Formen aussprechen. *C. Jordan* hat ein besonderes Verfahren angegeben, für einen gegebenen Grad die umfassendsten Gruppen zu berechnen, die auflösbaren Gleichungen zukommen; dabei ist dieselbe Aufgabe zuvor für die vorangehenden Grade zu lösen⁵⁶⁾.

15. Behandlung nicht auflösbarer Gleichungen. Ist die Gleichung $f(x) = 0$ nicht auflösbar, so stellt man wiederum für ihre

51) *C. Jordan*, traité p. 41 ff.; *E. Netto*, Substitutionentheorie p. 87.

52) ebendasselbst.

53) *Jordan* a. a. O.; *Netto*, Substitutionentheorie p. 90.

54) Man kann auch eine Bedingung dafür aufstellen, dass eine Wurzel der Gleichung durch Radikale gefunden werden kann; ist die Gleichung irreducibel, so kann dann nachher jede Wurzel der Gleichung gefunden werden. Vgl. *Abel* oeuvr. 2, p. 221; *O. Hölder*, Math. Ann. 38 (1891), p. 311 u. 312, wo ein spezieller Fall behandelt ist; *D. Selivanoff*, Acta math. 19 (1895), p. 73.

55) *C. Jordan*, traité p. 387. *H. Weber* nennt die auflösbaren Gleichungen metacyklisch; man vgl. dazu Nr. 25.

56) ebendasselbst p. 385 ff.

Gruppe Γ die Reihe $\Gamma, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots \Gamma_{q-1}, 1$ der Zusammensetzung her. Diese Reihe ergibt gewisse Gruppen $\Gamma/\Gamma_1, \Gamma_1/\Gamma_2, \Gamma_2/\Gamma_3, \dots \Gamma_{q-1}$, die „Faktorgruppen“ der Gruppe Γ . Diese Faktorgruppen sind einfach, aber nicht alle von Primzahlordnung, denn sonst wäre die Gleichung auflösbar. Die Gruppe Γ der Gleichung kann (Nr. 10) auf Γ_1 reduziert werden durch Adjunktion einer natürlichen Irrationalität. Diese genügt dabei einer Gleichung, deren Gruppe mit Γ/Γ_1 holoeidrisch isomorph und einfach ist. Durch eine zweite Adjunktion reduziert man die Gruppe auf Γ_2 ; die dazu nötige Irrationalität genügt einer Gleichung, deren Gruppe mit Γ_1/Γ_2 holoeidrisch isomorph und einfach ist. So fährt man fort. Man kann also die ursprüngliche Gleichung durch eine Kette von Gleichungen ersetzen. In dieser Kette besitzt jede Gleichung eine einfache Gruppe. Diese einfachen Gruppen, die Faktorgruppen der Gruppe Γ , lassen sich bei der Behandlung der vorliegenden Gleichung absolut nicht vermeiden, auch dann nicht, wenn man accessorische Irrationalitäten herbeizieht⁵⁷). Die Faktorgruppen müssen immer wieder in den Gruppen auftreten, die den Gleichungen der zugezogenen Irrationalitäten zugehören.

Die Gleichungen mit einfacher Gruppe können insofern noch weiter behandelt werden, als man sie auf Normalgleichungen mit derselben Gruppe zurückführen kann; man vergl. Nr. 24⁵⁸).

16. Allgemeine Gleichungen. Eine Gleichung n^{ten} Grades wird „allgemein“ genannt, wenn die Koeffizienten als willkürliche Variable angesehen werden. Der Rationalitätsbereich besteht dabei aus den rationalen Funktionen dieser Variablen. Man kann zugleich noch verschiedene Auffassungen annehmen, von denen die beiden extremsten am wichtigsten sind. Entweder nimmt man die Koeffizienten dieser rationalen Funktionen als rationale Zahlen an oder man lässt ganz beliebige Koeffizienten in diesen Funktionen zu, so dass man also gewissermassen alle numerischen Irrationalitäten adjungiert. Die letzte Auffassung ist die bequemste, weil alle die etwa notwendig werdenden Einheitswurzeln dadurch mit zum Rationalitätsbereich ge-

57) Dies hat im Grund schon *Galois* erkannt: man vgl. *oeuvre*, p. 25, wo es wenigstens für eine Gleichung mit einfacher Gruppe ausgesprochen ist. Der allgemeine Beweis beruht auf einem Satz von *C. Jordan*, *Math. Ann.* 1 (1869), p. 157, traité p. 271; vgl. auch oben den Schluss von Nr. 11. Ausführlicher ist der Sachverhalt bei *O. Hölder*, *Math. Ann.* 34 (1889), p. 49 ff. dargestellt.

58) Hinsichtlich der Reduktion der Gleichungen auf Normalgleichungen

hören. Es entspricht auch diese Auffassung dem schon von *Abel* eingenommenen Standpunkt⁵⁹⁾.

Unter der Auflösung der allgemeinen Gleichung n^{ten} Grades oder der „litteralen“ Lösung der Gleichung n^{ten} Grades versteht man die Darstellung der Wurzeln durch „explícite algebraische Ausdrücke“, d. h. durch Ausdrücke, die sich aus Radikalen zusammensetzen (Nr. 13), wobei diese Ausdrücke die variablen Koeffizienten der Gleichung enthalten und für willkürliche Werte der Variablen die Gleichung befriedigen müssen. Die litterale Lösung der Gleichungen ist bis zum 4^{ten} Grade möglich. Diese Lösung fügt sich vollständig der *Galois*-schen Theorie ein. Da die Koeffizienten der Gleichung jetzt unabhängige Variable sind, so gilt dasselbe von den Wurzeln. Die *Galois*'sche Gruppe besteht hier aus der Gesamtheit der $n!$ Substitutionen von x_1, x_2, \dots, x_n , fällt also mit der „symmetrischen Gruppe“ [I A 6, Nr. 7] zusammen. Das Resultat von Nr. 7 besagt jetzt, dass von zwei Funktionen der Variablen x die zweite in der ersten ausgedrückt werden kann, wenn die zweite Funktion bei allen den Substitutionen *formal* ungeändert bleibt, bei denen die erste *formal* ungeändert bleibt. Jener für spezielle Gleichungen gültige Satz geht also hier in den *Lagrange*'schen Satz über⁶⁰⁾.

17. Gleichungen der ersten vier Grade. Die Auflösung der Gleichung 2^{ten} Grades beruht darauf, dass für $n = 2$ die aus der Identität bestehende Gruppe eine invariante Untergruppe der symmetrischen Gruppe von Primzahlindex ist. Die Funktion $x_1 - x_2$ bleibt nur für die identische Substitution ungeändert und man kann deshalb mit ihrer Hilfe x_1 und x_2 ausdrücken, während sie selbst durch eine Quadratwurzelauszug gefunden wird.

Auch für $n = 3$ hat die symmetrische Gruppe nur eine ausgezeichnete Untergruppe von Primzahlindex, die Gruppe der „geraden“ Substitutionen⁶¹⁾. Die Adjunktion von $P = (x_1 - x_2)(x_1 - x_3)(x_2 - x_3)$ reduziert die Gruppe der Gleichung auf die Gruppe der geraden Substitutionen, die hier aus den Potenzen des Cyklus $(x_1 x_2 x_3)$ bestehen. Die ursprüngliche Gleichung ist nach der Adjunktion cyklisch und die Methode von Nr. 8 führt zur Lösung. Man bildet mit Hilfe der dritten Einheitswurzel α die Funktionen

$$x_1 + \alpha x_2 + \alpha^2 x_3 \quad \text{und} \quad x_1 + \alpha^2 x_2 + \alpha x_3,$$

59) Oeuvr. 2, p. 219, 220.

60) Vgl. Nr. 7.

61) I A 6, Nr. 7.

deren dritte Potenzen und deren Produkt dem durch die genannte Adjunktion erweiterten Rationalitätsbereich angehört. Ist die Gleichung $x^3 + px^2 + qx + r = 0$, so findet man

$$(8) \begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 = -p \\ x_1 + \alpha x_2 + \alpha^2 x_3 = \sqrt[3]{-p^3 + \frac{9}{2}pq - \frac{27}{2}r - \frac{3}{2}(\alpha^2 - \alpha)P} \\ x_1 + \alpha^2 x_2 + \alpha x_3 = \sqrt[3]{-p^3 + \frac{9}{2}pq - \frac{27}{2}r + \frac{3}{2}(\alpha^2 - \alpha)P} \end{cases}$$

$$(9) \quad (x_1 + \alpha x_2 + \alpha^2 x_3)(x_1 + \alpha^2 x_2 + \alpha x_3) = p^2 - 3q.$$

Die Grössen x_1, x_2, x_3 bestimmen sich aus (8) und es wird

$$(10) \quad 3x_1 = -p + \sqrt[3]{-p^3 + \frac{9}{2}pq - \frac{27}{2}r - \frac{3}{2}(\alpha^2 - \alpha)P} + \sqrt[3]{-p^3 + \frac{9}{2}pq - \frac{27}{2}r + \frac{3}{2}(\alpha^2 - \alpha)P},$$

wobei wegen (9) das Produkt der beiden dritten Wurzeln gleich $p^2 - 3q$ sein muss. Wählt man im übrigen auf der rechten Seite von (10) die dritten Wurzeln auf alle Arten, so erhält man ausser x_1 noch x_2 und x_3 aus derselben Formel. Es ist P^2 gleich der Diskriminante D der Gleichung und

$$D = -4p^3r + p^2q^2 + 18pqr - 4q^3 - 27r^2.$$

Bedenkt man noch, dass $\alpha^2 - \alpha = \pm i\sqrt{3}$, so erhält man für $p = 0$ die gewöhnliche *Cardanische* Formel⁶²⁾

$$x = \sqrt[3]{-\frac{r}{2} + \sqrt{\frac{r^2}{4} + \frac{q^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{r}{2} - \sqrt{\frac{r^2}{4} + \frac{q^3}{27}}}$$

als Lösung der Gleichung $x^3 + qx + r = 0$.

Der Fall, in welchem die Koeffizienten q und r reell sind und $\frac{r^2}{4} + \frac{q^3}{27}$ negativ ist, ist bemerkenswert. Es sind in diesem Falle die drei Wurzeln x_1, x_2, x_3 reell und ergeben sich aus der *Cardanischen* Formel auf imaginärem Wege⁶³⁾. Man kann diesen Fall, welcher der *casus irreducibilis* genannt wird, mit der Trisektion des Winkels [III A 2] in Verbindung bringen. Zu diesem Zweck hat man die Gleichung

62) Zuerst von *G. Cardano* wider den Willen des Entdeckers (p. 503) publiziert.

63) Dass die Formel auch in diesem Falle die Wurzeln liefert, hat *Rafaele Bombelli* bemerkt (l'algebra 1579), der hierdurch veranlasst wurde, die imaginären

$x^3 + px + q = 0$ auf diejenige, welche $\sin \frac{\varphi}{3}$ in Funktion von $\sin \varphi$ definiert, d. h. auf $x^3 - \frac{3}{4}x + \frac{1}{4}\sin \varphi = 0$ zurückzuführen⁶⁴).

Für den Grad $n = 4$ hat man zunächst wieder die *Galois'sche* Gruppe der allgemeinen Gleichung auf die der geraden Substitutionen zu reduzieren, was durch Adjunktion von

$$P = (x_1 - x_2)(x_1 - x_3)(x_1 - x_4)(x_2 - x_3)(x_2 - x_4)(x_3 - x_4),$$

d. h. durch Adjunktion der Quadratwurzel aus der Diskriminante geschieht. Die Gruppe der geraden Vertauschungen hat auch nur eine invariante Untergruppe von Primzahlindex. Diese Untergruppe besteht aus den vier Substitutionen 1, $(x_1x_2)(x_3x_4)$, $(x_1x_3)(x_2x_4)$ und $(x_1x_4)(x_2x_3)$. Die Funktion $x_1x_2 + x_3x_4 = y_1$, welche bei diesen Substitutionen ungeändert bleibt und bei allen anderen *geraden* Substitutionen sich ändert, ist Wurzel der Resolvente

$$(y - x_1x_2 - x_3x_4)(y - x_1x_3 - x_2x_4)(y - x_1x_4 - x_2x_3) = 0.$$

Diese Resolvente ergibt sich in der Form

$$(11) \quad y^3 - yy^2 + (pr - 4s)y - [s(p^2 - 4q) + r^2] = 0,$$

wenn als Gleichung 4^{ten} Grades

$$(12) \quad x^4 + px^3 + qx^2 + rx + s = 0$$

angenommen worden ist. Die Koeffizienten dieser Resolvente sind also rational in den Koeffizienten der Gleichung 4^{ten} Grades und erfordern die Quadratwurzel aus der Diskriminante zu ihrer Darstellung nicht. Durch die Adjunktion dieser Quadratwurzel erscheint die Resolvente als *cyklische* Gleichung dritten Grades.

Durch die Adjunktion der Grösse y_1 , die noch zu der Adjunktion von P hinzukommt, wird die Gruppe der Gleichung (12) auf die Gruppe Δ jener vier Substitutionen reduziert. Die vier Substitutionen sind „vertauschbar“, d. h. es geben zwei von ihnen T und S dasselbe Produkt, ob man die Produktbildung nach der Formel TS oder nach der Formel ST vornimmt. Es konstituieren deshalb die beiden Substitutionen 1 und $(x_1x_2)(x_3x_4)$ eine *invariante* Untergruppe Δ_1 der Gruppe Δ . Die Funktion x_1x_2 bleibt für die Substitutionen von Δ_1 ungeändert und ändert sich bei jeder andern Substitution von Δ in x_3x_4 . Die Funktion x_1x_2 genügt also einer Gleichung 2^{ten} Grades, nämlich der Gleichung

64) Zuerst findet sich diese trigonometrische Lösung bei *Vieta*, man vgl. *F. Vieta, Opera mathematica op. atque stud. F. a Schooten, Lugduni Batavorum 1646*, p. 91, wozu noch die ebendasselbst sich befindende appendix ab *Alexandro Andersono operi subnixa* p. 159 beizuziehen ist.

$$(z - x_1 x_2)(z - x_3 x_4) = z^2 - (x_1 x_2 + x_3 x_4)z + x_1 x_2 x_3 x_4 = 0,$$

deren Koeffizienten dem zweimal erweiterten Rationalitätsbereich angehören. Wir erweitern den Rationalitätsbereich zum dritten Mal, indem wir zu den früher adjungierten Grössen noch $x_1 x_2$ hinzu adjungieren. Die Gruppe der Gleichung (12) ist nun die Gruppe Δ_1 . Die Funktion $x_1 - x_2$ geht für die nichtidentische Substitution von Δ_1 in ihr Entgegengesetztes über, lässt sich also durch eine Quadratwurzelauszuehung bestimmen. In $x_1 - x_2$ und den früher adjungierten Grössen und den Koeffizienten p, q, r, s kann man x_1, x_2, x_3 und x_4 selbst darstellen.

Statt der Funktion $y_1 = x_1 x_2 + x_3 x_4$ kann man auch die Funktion $\theta_1 = (x_1 + x_2 - x_3 - x_4)^2$ benutzen, die bei genau denselben Substitutionen ungeändert bleibt. Nach Nr. 7 und Nr. 16 kann man y_1 in θ_1 ausdrücken und umgekehrt. Es ergibt sich

$$y_1 = \frac{\theta_1 - p^2 + 4q}{4},$$

und es geht durch diese Substitution die Resolvente (11) in

$$\theta^3 - (3p^2 - 8q)\theta^2 + (3p^4 - 16p^2q + 16q^2 + 16pr - 64s)\theta - (p^3 - 4pq + 8r)^2 = 0$$

über. Die drei Wurzeln $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ dieser neuen Resolvente sind Quadrate ganzer Funktionen der x , wodurch nahe gelegt wird, die Quadratwurzeln $\sqrt{\theta_1}, \sqrt{\theta_2}, \sqrt{\theta_3}$ einzuführen. Es ist dann

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = -p$$

$$x_1 + x_2 - x_3 - x_4 = \sqrt{\theta_1}$$

$$x_1 - x_2 + x_3 - x_4 = \sqrt{\theta_2}$$

$$x_1 - x_2 - x_3 + x_4 = \sqrt{\theta_3}.$$

Hierdurch ergeben sich x_1, x_2, x_3, x_4 gleich zusammen. Trotz dieser Veränderung in der Anordnung liegt vom *substitutionentheoretischen Standpunkt* keine wesentlich neue Lösung vor. Die Adjunktion von $x_1 + x_2 - x_3 - x_4$ bedeutet genau dasselbe wie die Adjunktion von $x_1 x_2$. Die gleichzeitige Adjunktion von $x_1 + x_2 - x_3 - x_4$ und $x_1 - x_2 + x_3 - x_4$ bedeutet dasselbe, was die gleichzeitige Adjunktion von $P, x_1 x_2$ und $x_1 - x_2$ besagt, denn in beiden Fällen ist die identische Substitution die einzige, die alle adjungierten Funktionen ungeändert lässt. So braucht nun auch $x_1 - x_2 - x_3 + x_4$ nicht mehr besonders eingeführt zu werden. Es ist

$$\begin{aligned} (x_1 + x_2 - x_3 - x_4)(x_1 - x_2 + x_3 - x_4)(x_1 - x_2 - x_3 + x_4) \\ = -p^3 + 4pq - 8r. \end{aligned}$$

Hierdurch ist auch die Willkürlichkeit in jenen Quadratwurzeln beschränkt⁶⁵⁾.

Die Auflösung der Gleichung 2^{ten} Grades war schon im Altertum bekannt. Die Gleichung vom 3^{ten} Grad ist zuerst von *Scipione dal Ferro* (1496—1525) und 1535 durch *Nicolo Tartaglia*, die vom 4^{ten} bald nachher von *Lodovico Ferrari* gelöst worden. Andere Lösungen sind später von *Réné Des-Cartes*, von *Walter von Tschirnhausen* und *L. Euler* gegeben worden. *Lagrange*⁶⁶⁾ hat, indem er die älteren Lösungsmethoden analysierte, bemerkt, dass die Radikale, vermittelt deren die Lösung erreicht wird, sich in den Wurzeln x_1, x_2, \dots der zu lösenden Gleichung rational ausdrücken lassen. Indem er die Resolvente bildete, der eine solche Funktion von x_1, x_2, \dots genügt und dabei die anderen Funktionen von x_1, x_2, \dots , welche dieselbe Resolvente befriedigen, aufstellte, wurde er zur Anwendung der Substitutionen geführt. Er konnte nun direkt Lösungen aufbauen; diese unterscheiden sich in der Form kaum von den soeben gegebenen. Da nun bei der Gleichung 3^{ten} Grades der Ausdruck $x_1 + \alpha x_2 + \alpha^2 x_3$ und beim 4^{ten} Grad der Ausdruck $x_1 - x_2 + x_3 - x_4$ auftrat, so kam *Lagrange* dazu, den Ausdruck $x_1 + \varrho x_2 + \varrho^2 x_3 + \dots + \varrho^{n-1} x_n$ zu betrachten, in dem ϱ eine n^{te} Einheitswurzel bedeutet. Dieser Ausdruck führte auf die nach *Lagrange* benannte Resolvente⁶⁷⁾. Wenn nun auch die Auflösung der Gleichung n^{ten} Grades auf diesem Wege nicht gelingen konnte, so hat diese Betrachtung doch in hohem Masse die Entwicklung der Gleichungstheorie gefördert. Ausser *Lagrange* sind hier noch besonders *Waring*⁶⁸⁾ und *Aug. Vandermonde*⁶⁹⁾ zu nennen als solche, welche die Theorie der symmetrischen Funktionen [I B 3 b, Nr. 1—3] und der Resolventenbildung [I B 3 f] entwickelt haben.

65) Hinsichtlich der älteren Auflösungsmethoden für die Gleichungen 3^{ten} und 4^{ten} Grades vgl. man *L. Matthiessen*, Grundzüge der antiken und modernen Algebra der litteralen Gleichungen, Leipzig 1878. Hier finden sich auch die vielfachen modernen Formen der Lösungen, insbesondere auch diejenigen, die sich auf die Invariantentheorie [I B 2, Nr. 8, Anm. 169] gründen, und ein chronologisches Verzeichnis der Gesamtlitteratur.

66) *Réflexions etc. oeuvr.* 3, p. 205 ff. (nouv. mém. d. l'Acad. de Berlin 1770, 1771).

67) *Oeuvr.* 3, p. 331 ff.; man vgl. auch die ausführliche Darstellung bei *J. A. Serret*, 1. Aufl. p. 229, 3. Aufl. 2, p. 454, 5. Aufl. 2, p. 483.

68) *Miscellanea analytica, Cantabrigiae* 1762, p. 34. *Meditationes algebraicae, Cantabrigiae* 1782, p. 1—30, wo die allgemeine Theorie der symmetrischen Funktionen behandelt ist; ausserdem beachte man noch besonders p. 36, 81, 84, wo verschiedene einfache Resolventen gebildet werden.

69) *Histoire de l'Académie des sciences de Paris* 1771, p. 365 ff.; diese Arbeit ist schon im Jahr 1770 gelesen worden.

18. Nichtauflösbarkeit der allgemeinen Gleichungen höherer Grade. Die Auflösung der allgemeinen Gleichung n^{ten} Grades ist für $n \geq 5$ nicht mehr durch Wurzelzeichen möglich. Die *Galois'sche* Gruppe der Gleichung ist zunächst die symmetrische Gruppe, und diese hat nur *eine* invariante Untergruppe von Primzahlindex, die Gruppe der geraden Substitutionen oder die „alternierende“ Gruppe [I A 6, Nr. 7]. Diese aber besitzt keine ausgezeichnete Untergruppe mehr, die von ihr selbst und der Identität verschieden wäre⁷⁰⁾. Die Faktoren der Zusammensetzung sind also für die symmetrische Gruppe 2 und $\frac{1}{2}n!$, sobald $n \geq 5$ ist. Nach dem *Galois'schen* Kriterium ist also die Auflösung nicht möglich.

Den ersten wirklichen Beweis für die Nichtauflösbarkeit der allgemeinen Gleichungen, deren Grad den vierten übersteigt, hat 1826 *Abel* gegeben⁷¹⁾. Sein Beweis besteht aus zwei Teilen. In dem ersten Teil wird gezeigt, dass die Lösung, wenn sie überhaupt möglich ist, so gestaltet werden kann, dass alle Radikale sich in den Wurzeln x_1, x_2, \dots, x_n der zu lösenden Gleichung rational ausdrücken lassen. Damit war also die Allgemeingiltigkeit der Bemerkung bewiesen, die *Lagrange* an den bekannten Auflösungen der Gleichungen 3^{ten} und 4^{ten} Grades gemacht hatte. Der zweite Teil des *Abel'schen* Beweises ist substitutionentheoretischer Natur. Es wird hier gezeigt, dass das innerste Wurzelzeichen — von einer numerischen Konstanten abgesehen — mit dem Differenzenprodukt der Grössen x_1, x_2, \dots, x_n übereinstimmen müsste; dasjenige Wurzelzeichen, welches nur das eine innerste Wurzelzeichen enthielte, führt dann für $n = 5$ auf eine Funktion von x_1, x_2, \dots, x_5 mit widersprechenden Eigenschaften. Nun wird noch auf die Nichtauflösbarkeit der allgemeinen Gleichungen von höherem als fünftem Grad geschlossen. Einen Vorläufer hat *Abel* an *P. Ruffini* gehabt⁷²⁾. *Ruffini* setzt ohne Beweis voraus, dass die in die Lösung eingehenden Radikale sich rational in x_1, x_2, \dots, x_5 ausdrücken lassen; dagegen führt er den substitutionentheoretischen Teil des Beweises einwandfrei durch, zugleich in derjenigen ein-

70) *L. Kronecker*, Berl. Ber. 1879, p. 208–210; *C. Jordan*, traité p. 63, 64.

71) *J. f. Math.* 1 (1826), p. 65 = *oeuvres*, nouv. éd. 1, p. 66; einen nicht vollständig ausgeführten Beweis hatte *Abel* bereits im Jahr 1824 veröffentlicht, s. *oeuvr.* 1, p. 28.

72) *Riflessioni intorno alla soluzione delle equazioni algebriche generali*, Modena 1813. Hinsichtlich dieser und der früheren Arbeiten von *Ruffini* vgl. *H. Burkhardt*, „die Anfänge der Gruppentheorie und Paolo Ruffini“, *Zeitschr. Math. Phys.* 37 (1892), Suppl. p. 119; *ital. Ann. di Mat.* (2) 22 (1894), p. 175 [I A 6, Nr. 1].

facheren Form, die meist als „*Wantzel'sche* Modifikation des *Abel'schen* Beweises“ bezeichnet worden ist. *Kronecker* hat den ersten Teil des *Abel'schen* Beweises noch erheblich vereinfacht⁷³⁾.

19. Gleichungen mit regulärer Gruppe. Eine irreducible Gleichung mit der Eigenschaft, dass von ihren Wurzeln jede in jeder rational ist, wird von *Kronecker* eine „*Galois'sche* Gleichung“ genannt⁷⁴⁾; die *Galois'schen* Resolventen besitzen die Eigenschaft. Die Gruppe Γ einer solchen Gleichung muss (Nr. 6) transitiv sein, und da x_i in x_k ausgedrückt werden kann, so muss jede Substitution der Gruppe, die x_k ungeändert lässt, auch x_i ungeändert lassen. Eine genauere Überlegung ergibt, dass die Zahl der Operationen von Γ , d. h. die Ordnung der Gruppe, mit der Zahl der Buchstaben x_1, x_2, \dots, x_n , d. h. mit dem Grad der Gleichung, also dem „Grad der Substitutionsgruppe“, übereinstimmen muss. Es giebt dann genau eine Substitution, die einen gegebenen Buchstaben in einen gegebenen Buchstaben überführt. Eine solche Gruppe wird als „regulär“ bezeichnet.

20. Gleichungen mit commutativer (permutabler) Gruppe. Eine Gleichung $f(x) = 0$, deren Gruppe aus vertauschbaren⁷⁵⁾ Operationen besteht, ist auflösbar⁷⁶⁾. Es lassen sich nämlich aus einer solchen Gruppe gewisse Operationen $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$ mit den Ordnungen m_1, m_2, m_3, \dots so aussuchen, dass $m_1 \geq m_2 \geq m_3 \geq \dots$, dass ferner m_1 ein Vielfaches von m_2 , dieses ein Vielfaches von m_3 ist u. s. f., und dass in der Formel

$$\theta_1^{\mu_1} \theta_2^{\mu_2} \theta_3^{\mu_3} \dots$$

für $\mu_1 = 0, 1, \dots, m_1 - 1$; $\mu_2 = 0, 1, \dots, m_2 - 1$; $\mu_3 = 0, 1, \dots, m_3 - 1, \dots$ jede Operation der Gruppe einmal und nicht häufiger enthalten ist⁷⁷⁾. Ist nun p ein Primteiler von m_1 , so bilden die Operationen

$$\theta_1^{v_1 p} \theta_2^{\mu_2} \theta_3^{\mu_3} \dots \begin{pmatrix} v_1 = 0, 1, \dots, \frac{m_1}{p} - 1 \\ \mu_2 = 0, 1, \dots, m_2 - 1 \\ \mu_3 = 0, 1, \dots, m_3 - 1 \\ \dots \dots \dots \end{pmatrix}$$

eine ausgezeichnete Untergruppe vom Index p .

73) Berl. Ber. 1879, p. 205.

74) Andere Schriftsteller nennen so die Gleichungen von Nr. 25; *Weber* nennt die obigen Gleichungen „Normalgleichungen“.

75) Die Operationen T und S sind vertauschbar, wenn $TS = ST$ ist.

76) *C. Jordan*, traité p. 287 ff.

77) *E. Schering*, Gött. Abh. 14 (1868), math. Cl. p. 3; *L. Kronecker*, Berl. Ber. 1870, p. 881 = Werke 1, p. 271; *G. Frobenius* u. *L. Stickelberger*, J. f. Math. 86

Nun bilde man eine Funktion $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ der Wurzeln der Gleichung, die sich bei den Substitutionen der Untergruppe nicht ändert und bei allen anderen Substitutionen der Gleichungsgruppe sich numerisch ändert. Die Grösse g genügt nach Nr. 10 einer cyklischen Gleichung und kann nach Nr. 8 durch Wurzelausziehungen gefunden werden. Durch die Adjunktion von g wird die Gruppe der Gleichung $f(x) = 0$ auf die genannte ausgezeichnete Untergruppe reduziert. Durch Wiederholung des Verfahrens wird die Gleichung aufgelöst.

21. Abel'sche Gleichungen. In seinem „mémoire sur une classe particulière d'équations résolubles algébriquement“ hat *Abel* im wesentlichen drei Sätze aufgestellt, die so formuliert werden können⁷⁸⁾:

Erster Satz: Wenn von zwei Wurzeln x_1 und x_2 einer irreducibeln Gleichung die zweite in der ersten rational ausgedrückt werden kann, so dass $x_2 = \theta(x_1)$ ist, wenn ferner unter den Grössen

$$x_1, \theta(x_1), \theta(\theta(x_1)), \theta(\theta(\theta(x_1))), \dots$$

die n ersten von einander verschieden und die $n + 1^{\text{te}}$ gleich x_1 ist, so ist $m \cdot n$ der Grad der irreducibeln Gleichung, und diese lässt sich in m Gleichungen n^{ten} Grades zerlegen, deren Koeffizienten von je einer Wurzel einer Gleichung m^{ten} Grades abhängen.

Zweiter Satz: Wenn die n verschiedenen Wurzeln einer Gleichung n^{ten} Grades in der Form $x_1, \theta(x_1), \theta(\theta(x_1)), \dots$ dargestellt werden können, wo θ eine rationale Funktion bedeutet, für deren n^{te} Iteration $\theta^{(n)}$ die Relation $\theta^{(n)}(x_1) = x_1$ besteht, so ist die Gleichung auflösbar.

Dritter Satz: Die Wurzeln einer Gleichung seien alle in einer von ihnen x_1 rational ausdrückbar. Falls irgend zwei Wurzeln durch $\theta(x_1)$ und $\theta_1(x_1)$ dargestellt sind, so sei immer $\theta_1(\theta(x_1)) = \theta(\theta_1(x_1))$. Die Gleichung ist dann auflösbar.

Von den im ersten Satz auftretenden Gleichungen n^{ten} Grades hat *Abel* ausserdem bewiesen, dass jede nach Adjunktion jener Wurzel der Gleichung m^{ten} Grades die Voraussetzungen des zweiten Satzes erfüllt, also lösbar ist. Die Gleichungen des dritten Satzes heissen „*Abel'sche Gleichungen*“, die des zweiten Satzes bilden einen Spezialfall davon und heissen „*einfache Abel'sche Gleichungen*“⁷⁹⁾.

(1879), p. 217; *Netto*, Substitutionentheorie p. 143; *H. Weber*, Math. Ann. 20 (1882), p. 301, Algebra 2, p. 32 [I A 6, Nr. 20].

78) J. f. Math. 4 (1829), p. 131 ff. u. *N. H. Abel*, oeuvr. nouv. éd. p. 487, 491, 492.

Die Sätze lassen sich mit der *Galois'schen* Theorie leicht in Verbindung setzen, was hier nur für den zweiten ausgeführt werden mag. Die Gleichung kann als irreducibel angesehen werden, da der andere Fall sich auf diesen zurückführen lässt. Nun können die Wurzeln so mit $x_1, x_2, \dots x_n$ bezeichnet werden, dass

$$x_2 = \theta(x_1), x_3 = \theta(x_2), x_4 = \theta(x_3) \dots$$

ist. Es giebt, wenn k beliebig vorgeschrieben wird, eine Substitution der Gleichungsgruppe, die x_1 in x_{1+k} überführt. Diese Substitution muss, wenn sie in den vorigen Relationen ausgeführt wird, wieder richtige Relationen ergeben, sie muss also x_2 in x_{2+k} , x_3 in x_{3+k} u. s. f. verwandeln. Die Gruppe besteht somit aus den Wiederholungen (Potenzen) der cyklischen Substitution $(x_1 x_2 x_3 \dots x_n)$. Nun kann aus Nr. 8 oder Nr. 20 auf die Auflösbarkeit geschlossen werden.

Die Gleichungen des dritten Satzes ergeben sich als solche mit permutabler Gruppe und lassen sich also unter Nr. 20 subsumieren. Umgekehrt sind alle Gleichungen mit permutabler Gruppe, wenigstens dann, wenn sie irreducibel sind, *Abel'sche* Gleichungen⁸⁰⁾.

Den allgemeinen Ausdruck für die Wurzeln *Abel'scher* Gleichungen hat *Kronecker* gefunden⁸¹⁾; zugleich ergab sich ihm das Resultat, dass alle Wurzeln *Abel'scher* Gleichungen mit ganzzahligen Koeffizienten gleich rationalen Funktionen von Einheitswurzeln sind mit rationalen Koeffizienten⁸²⁾.

22. Kreisteilungsgleichungen. Es sei p eine Primzahl. Die p^{ten} Einheitswurzeln genügen der Gleichung $x^p - 1 = 0$. Nimmt man aus der linken Seite den rationalen Faktor $x - 1$ heraus, so bleibt die Gleichung $x^{p-1} + x^{p-2} + \dots + x^2 + x + 1 = 0$ übrig. Diese Gleichung ist irreducibel⁸³⁾; dabei ist angenommen, dass zum

80) *C. Jordan*, traité p. 286 ff.; *E. Netto*, Substitutionentheorie (1882), p. 206; *H. Weber*, Algebra 1, p. 534 ff.

81) Berl. Ber. 1853, p. 371 für einfache *Abel'sche* Gleichungen und 1877, p. 849, für „mehrfältige“. Man vgl. auch *G. P. Young*, Am. J. of math. 9 (1887), p. 225 u. p. 238; *H. Weber*, Marburger Ber. 1892, p. 58; *E. Netto*, Math. Ann. 42 (1893), p. 447; *H. Weber*, Algebra 2, p. 107.

82) Für einfache *Abel'sche* Gleichungen Berl. Ber. 1853; ausführliche Beweise bei *H. Weber*, Acta math. 8 (1886), p. 193 u. *D. Hilbert*, Gött. Nachr. 1896, p. 29. In den Berl. Ber. von 1877, p. 845 hat *Kronecker* gezeigt, wie dies Resultat auf die mehrfaltigen *Abel'schen* Gleichungen ausgedehnt wird, die durch Komposition aus den einfachen gebildet werden können. Hinsichtlich dieser Komposition vgl. man noch *Kronecker*, Berl. Ber. 1882, p. 1059.

83) *Gauss*, Werke 1, p. 317. Vgl. hierzu auch *Eisenstein*, J. f. Math. 39 (1850), p. 167 u. *L. Kronecker*, J. f. Math. 29 (1845), p. 280, J. de math. [1] 19 (1854), p. 177, [2] 1 (1856), p. 202, Werke (1895) 1, p. 1, 75, 90.

Rationalitätsbereich nur die rationalen Zahlen gehören, dass also der „absolute“ Rationalitätsbereich zu grunde gelegt ist [I B 1 c, Nr. 2]. Die genannten Gleichungen sind von Gauss ausführlich behandelt worden [I C 4]. Da die p^{ten} Einheitswurzeln durch p äquidistante Punkte eines Kreises geometrisch repräsentiert werden, so hängt von diesen Gleichungen die Teilung des Kreises in p gleiche Teile ab, man nennt sie deshalb Kreisteilungsgleichungen⁸⁴).

Setzt man $\alpha = e^{\frac{2\pi i}{p}}$, so sind die sämtlichen Wurzeln der Gleichung

$$(13) \quad x^{p-1} + x^{p-2} + \dots + x + 1 = 0$$

durch $\alpha, \alpha^2, \alpha^3, \dots, \alpha^{p-1}$ dargestellt. Diese Grössen heissen die „primitiven p^{ten} Einheitswurzeln“. Man kann eine ganze Zahl g auf mehrere Arten so bestimmen, dass die Potenzen $g, g^2, g^3, \dots, g^{p-1}$ mit p dividiert, abgesehen von der Ordnung, die Reste $1, 2, \dots, p-1$ ergeben⁸⁵); dabei giebt g^{p-1} stets den Rest 1.⁸⁶) Man nennt g eine „Primitivwurzel“ der Primzahl p [I C 1]. Die primitiven p^{ten} Einheitswurzeln können nun auch in der Form

$$\alpha^{g^\mu} \quad (\mu = 0, 1, 2, \dots, p-2)$$

geschrieben werden.

Gauss hat für die Behandlung der Kreisteilungsgleichungen zwei Verfahren angegeben. Das eine dient dazu, die Gleichung (13) auf Gleichungen niedrigerer Grade zu reduzieren und beruht auf der Einführung der Perioden⁸⁷). Unter einer „Periode“ versteht Gauss im Grund eine Summe

$$(14) \quad \alpha^2 + \alpha^{2g^e} + \alpha^{2g^{2e}} + \alpha^{2g^{3e}} + \dots + \alpha^{2g^{(f-1)e}},$$

wo f ein Teiler von $p-1$ und $ef = p-1$ ist. Der Wert dieser Summe hängt von der Wahl von g nicht ab und wird daher von Gauss mit (f, λ) bezeichnet. Gauss beweist nun, dass die verschiedenen zu demselben f gehörigen, d. h. aus f „Gliedern“ bestehenden Perioden $(f, \lambda), (f, \lambda'), (f, \lambda''), \dots$ alle in einer von ihnen rational dargestellt werden können⁸⁸). Die eine Periode, die zur Darstellung

84) Ausführlich wird die Kreisteilung behandelt von P. Bachmann, die Lehre von der Kreisteilung und ihre Beziehungen zur Zahlentheorie, Leipzig 1872. Vgl. auch E. Netto, Vorlesungen über Algebra, Leipzig 1896, 1, p. 259 ff.

85) Existenz und Eigenschaften der Primitivwurzeln hat zuerst Gauss bewiesen in den Disqu. arithm. (1801), vgl. Werke 1, p. 45; die Eigenschaften waren Lambert und Euler schon bekannt.

86) Satz von Fermat, opera math. (Tolosae 1679), p. 163.

87) Vgl. auch p. 421 Anm.

der übrigen benutzt wird, ergibt sich als Wurzel einer Gleichung e^{ten} Grades, der die genannten Perioden genügen. Ist ferner $f = e'f'$, so reduziert sich die Berechnung der aus f' Gliedern bestehenden Perioden auf die Berechnung einer Wurzel einer Gleichung e'^{ten} Grades, deren Koeffizienten in jener früheren schon als berechnet gedachten f -gliedrigen Periode sich ausdrücken⁸⁹⁾. So wird dann fortgefahren.

Im Besitz der *Galois'schen* Theorie kann man dies Verfahren so auffassen. Falls $x_\mu = \alpha^{\mu e}$ gesetzt wird, besteht die Gruppe der Gleichung (13) aus den Potenzen der Substitution $S = (x_1 x_2 \dots x_{p-1})$. Die Potenzen $1, S^e, S^{2e}, \dots, S^{(f-1)e}$ bilden eine ausgezeichnete Untergruppe vom Index e . Die Periode (f, λ) ist eine Funktion der Wurzeln, die für die Substitutionen der Untergruppe ungeändert bleibt und bei allen anderen Substitutionen der Gruppe sich numerisch ändert; dies lässt sich auch direkt beweisen. So wird also (f, λ) einer Gleichung e^{ten} Grades genügen, und die Adjunktion der Periode wird die Gruppe auf die genannte Untergruppe reduzieren. Diese ist überdies intransitiv, und es zerfällt die Gleichung.

Das zweite *Gauss'sche* Verfahren⁹⁰⁾ dient dazu, die im vorigen genannten Gleichungen $e^{\text{ten}}, e'^{\text{ten}}$ Grades auf reine Gleichungen zu reduzieren. Man kann auch mit Hilfe des Verfahrens gleich die ganze Gleichung (13) auf reine Gleichungen reduzieren. Sind $a, b, c, \dots m$ die Wurzeln der Gleichung e^{ten} Grades und ist R eine e^{te} Einheitswurzel, so wird der Ausdruck

$$a + Rb + R^2c + \dots + R^{e-1}m$$

gebildet. Die e^{te} Potenz dieses Ausdrucks berechnet sich in R rational. Es spielt also hier der Ausdruck eine Rolle, den *Lagrange* aus den Betrachtungen über Gleichungen 3^{ten} und 4^{ten} Grades gewonnen und seiner Resolvente der Gleichung n^{ten} Grades zu Grunde gelegt hatte.

Die Verallgemeinerung des zweiten *Gauss'schen* Verfahrens führte vermutlich *Abel* auf den in Nr. 21 genannten zweiten Satz. Als Verallgemeinerung des ersten *Gauss'schen* Verfahrens kann der erste *Abel'sche* Satz von Nr. 21 angesehen werden. Mit Hilfe dieser beiden Sätze hat dann *Abel* den dritten Satz entwickelt.

23. Teilungs- und Transformationsgleichungen der elliptischen Funktionen [II B 4 a]. In der Gleichung $x^n - a = 0$ kann man $a = e^u$ setzen, dann erscheint die Teilungsgleichung für die Exponentialfunktion,

89) p. 426—430.

90) p. 430—440.

indem die eine Wurzel $x_0 = e^{\frac{u}{p}}$ ist⁹¹⁾. Die sämtlichen Wurzeln sind $x_v = e^{\frac{u + 2v\pi i}{p}}$, wo $v = 0, 1, 2, \dots, p-1$. Hier fasst man u als variabel auf und nimmt als Rationalitätsbereich die rationalen Funktionen der Variablen e^u mit rationalen Koeffizienten. Die Gleichung ist irreducibel. Adjungiert man noch die p^{ten} Einheitswurzeln, so besteht (s. o. Nr. 9) die Gruppe der Gleichung aus den Potenzen derjenigen Substitution, die x_v in x_{v+1} überführt. Nachdem man also die Grössen $e^{\frac{2v\pi i}{p}}$, d. h. die Wurzeln der „Periodenteilungsgleichung“ berechnet hat, braucht man (Nr. 8), falls p eine Primzahl ist, nur noch eine p^{te} Wurzel auszuziehen, um die allgemeine Teilungsgleichung zu lösen. Die Gleichung für die Teilung der Perioden ist eben die in der vorigen Nummer betrachtete Kreisteilungsgleichung.

Die Teilungsgleichungen für die elliptischen Funktionen ergeben sich, indem man aus den elliptischen Funktionen mit dem Argument u die Funktionen mit dem Argument $\frac{u}{p}$ bestimmt; dabei mag p wieder als Primzahl angenommen sein. Die betrachteten Funktionen gehören alle zu demselben Periodensystem, und dieses soll sich aus den beiden „primitiven“ Perioden 2ω und $2\omega'$ ableiten. Die genannte Bestimmung kann nun für ein gegebenes p von einer einzigen Gleichung $G(w) = 0$ abhängig gemacht werden. In die Koeffizienten der Gleichung gehen noch gewisse, lediglich von den Perioden abhängige Grössen, die „Invarianten“ — beziehungsweise der „Modul“ — ein⁹²⁾; diese Grössen sind ebenso wie die Perioden als variabel anzusehen. Die Gleichung, die für variable Invarianten irreducibel ist, hat p^2 Wurzeln $w_{v,v'}$ ($v, v' = 0, 1, 2, \dots, p-1$), die den Argumenten

91) Der Name „Teilungsgleichung“ wird verständlicher, wenn man die Integrale betrachtet, durch deren Umkehrung die Funktionen — sei es nun die Exponentialfunktion oder die elliptischen Funktionen — entstehen. Sei $e^u = a$ und $e^{\frac{u}{p}} = x$, so bedeutet die Bestimmung von x die Bestimmung der oberen

Grenze in einem Integral $\int_1^x \frac{dx}{x}$, dessen Wert gleich dem p^{ten} Teil des Integrals $\int_1^a \frac{dx}{x}$ werden soll.

92) Hinsichtlich der Begriffe aus der Theorie der elliptischen Funktionen

$\frac{u + 2v\omega + 2v'\omega'}{p}$ entsprechen. Die Werte, die aus den Grössen $w_{r,v'}$ dadurch hervorgehen, dass $u = 0$ gesetzt wird, sollen $v_{r,v'}$ heissen; es sind diese Werte die Wurzeln der Periodenteilungsgleichung, wobei aber $v_{0,0}$ wegzulassen ist. *Abel* hat bereits gezeigt⁹³⁾, dass die allgemeine Teilungsgleichung durch Radikale gelöst werden kann, wenn man die Wurzeln der Periodenteilungsgleichung als bekannt ansieht. Vom Standpunkt der *Galois'schen* Theorie erklärt sich dies so. Nach Adjunktion der Grössen $v_{r,v'}$, welche der Teilung der Perioden entsprechen, ergibt sich die Gruppe der allgemeinen Teilungsgleichung dadurch, dass die Substitution $\begin{pmatrix} w_{r,v'} \\ w_{r,v'+1} \end{pmatrix}$ mit der Substitution $\begin{pmatrix} w_{r,v'} \\ w_{r,v'+1} \end{pmatrix}$ auf alle Arten kombiniert wird. Diese Gruppe ist kommutativ, weshalb die Auflösung der allgemeinen Teilungsgleichung nunmehr durch Radikale möglich ist (Nr. 20).

Die Wurzeln der Periodenteilungsgleichung bestimmen sich durch $p + 1$ Gleichungen vom Grade $p - 1$;⁹⁴⁾ diese Gleichungen enthalten in ihren Koeffizienten je eine Wurzel einer und derselben Gleichung $p + 1^{\text{ten}}$ Grades⁹⁵⁾. Wenn man diese Gleichung $p + 1^{\text{ten}}$ Grades als gelöst annimmt, so sind die $p + 1$ Gleichungen $p - 1^{\text{ten}}$ Grades sämtlich durch Wurzelzeichen lösbar⁹⁶⁾. Von der Gleichung $p + 1^{\text{ten}}$ Grades hat *Abel* vermutet, dass sie für $p > 3$ nicht durch Wurzelzeichen gelöst werden kann. *Galois* hat dazu den Beweisgrund beigebracht; seine in dem Briefe an *Chevalier* nur angedeuteten Überlegungen sind von *Betti* ergänzt worden⁹⁷⁾. Die Wurzeln $v_{r,v'}$ der Periodenteilungsgleichung lassen sich in Systeme ordnen und zwar kommen allgemein die Wurzeln

$$(15) \quad v_{r,v'} \quad v_{2r,2v'} \quad v_{3r,3v'} \quad \dots \quad v_{(p-1)r,(p-1)v'}$$

in ein System. So entstehen $p + 1$ Systeme von je $p - 1$ Grössen v . Die Substitutionen der Gruppe der Periodenteilungsgleichung führen die Wurzeln eines Systems in solche über, die gleichfalls zu einem

93) Oeuvr. 1, p. 294—305; man vgl. auch *K. G. J. Jacobi*, J. f. Math. 3 (1828), p. 86 (Werke 1 [1881], p. 243); *E. Betti*, Ann. mat. fis. 4 (1853), p. 81 u. *C. Jordan*, traité p. 337.

94) Dies ist im wesentlichen bei *Abel* a. a. O. bewiesen; bei ihm ist der Grad allerdings $\frac{p-1}{2}$, da er bei seiner Darstellung das Quadrat der Unbekannten als neue Unbekannte einführen kann.

95) *Abel*, oeuvr. 1, p. 305—310.

96) *Abel*, a. a. O. p. 310—314.

97) *Galois*, oeuvr. p. 26 ff.; *E. Betti*, Ann. mat. fis. 4 (1853), p. 81; man vgl. auch *C. Jordan*, traité p. 342 u. *L. Kronecker*, Berl. Ber. 1875, p. 498.

System zusammengehören; die Systeme werden dadurch unter einander vertauscht. Die Wurzeln $v_{1,0}$ und $v_{0,1}$ können in irgend zwei solche Wurzeln $v_{\mu,\mu'}$ und $v_{\nu,\nu'}$, die verschiedenen Systemen angehören, übergeführt werden, und es wird dann allgemeiner $v_{\alpha,\alpha'}$ durch $v_{\alpha\mu+\alpha'\nu, \alpha\mu'+\alpha'\nu'}$ ersetzt. Die Wurzeln eines Systems, z. B. die Grössen (16)

$$v_{0,1} \quad v_{0,2} \quad v_{0,3} \quad \dots \quad v_{0,p-1}$$

genügen einer Gleichung $p-1^{\text{ten}}$ Grades, deren Koeffizienten sich in einer symmetrischen Funktion s derselben Grössen (16) ausdrücken; diese Gleichung ist cyklisch und daher durch Wurzelzeichen lösbar, wobei natürlich s als adjungiert zu denken ist. Die Grösse s bestimmt sich aus einer Gleichung $p+1^{\text{ten}}$ Grades. Die Gruppe Γ dieser Gleichung ergibt sich aus der Art, wie die Systeme mit einander vertauscht wurden. Die zum Systeme (15) gehörende Grösse s werde mit $s_{\frac{v}{v'}}$ bezeichnet, wo der mod p zu verstehende uneigentliche

Bruch⁹⁸⁾ die Werte $0, 1, 2, \dots, p-1, \infty$ erhält. Die oben genannte Substitution führt nun jedes $s_{\frac{\alpha}{\alpha'}}$ in $s_{\frac{\mu\frac{\alpha}{\alpha'} + \nu}{\mu\frac{\alpha}{\alpha'} + \nu'}}$ über, wo μ, ν, μ', ν' vier

Reste des Moduls p bedeuten, für die $\mu\nu' - \mu'\nu$ nicht durch p teilbar ist. Alle Substitutionen von dieser Art in der Anzahl $(p-1)p(p+1)$ bilden die Gruppe Γ .⁹⁹⁾ Nach Adjunktion einer Quadratwurzel reduziert sich die Gruppe jener Gleichung $p+1^{\text{ten}}$ Grades auf $\frac{(p-1)p(p+1)}{2}$

Substitutionen [I A 6, Nr. 11] und diese Gruppe ist für $p \geq 5$ einfach¹⁰⁰⁾, weshalb die Gleichung nicht durch Radikale gelöst werden kann.

Bei der Transformation p^{ter} Ordnung der elliptischen Funktionen lässt sich der neue Modul in dem alten Modul und den Grössen $v_{\nu,\nu'}$ ausdrücken, was schon von *Abel* und *Jacobi* erkannt worden ist¹⁰¹⁾. Zwischen den vierten Wurzeln der beiden Moduln besteht eine Gleichung, die „Modulargleichung“¹⁰²⁾; diese stellt daher im wesentlichen

98) *Gauss*, Werke 1, p. 23.

99) Diese Gruppe ist auch von *E. Mathieu*, J. de math. [2], 5 (1860), p. 24 behandelt worden.

100) *Galois*, oeuvr. p. 27 ohne Beweis; vgl. dazu *C. Jordan*, traité p. 105. Die sämtlichen Untergruppen dieser Gruppe hat *J. Gierster*, Math. Ann. 18 (1881), p. 319 bestimmt.

101) *Abel*, Werke 1, p. 363 (J. f. M. 3 [1828]) *K. G. J. Jacobi*, Werke 1, Berlin 1881, p. 102 (fundamenta nova 1829).

102) *Jacobi*, J. f. M. 3 (1828), p. 192 (Werke 1, p. 251); *Ad. Sohncke*, J. f. Math. 16 (1837), p. 97; *H. Schröter*, de aequationibus modularibus diss. Regimonti Pr.

dasselbe Problem wie die betrachtete Teilungsgleichung vor. Für die Modulargleichung hat *Jacobi* eine andere, gleichwertige Gleichung eingeführt, die ebenfalls vom Grade $p + 1$ ist, die sogenannte „Multiplikatorgleichung“¹⁰³). Durch die Eigenschaften dieser Gleichungen ist eine besondere Art algebraischer Gleichungen $p + 1$ ten Grades definiert, die wir jetzt „*Jacobi*’sche Gleichungen“ nennen und unabhängig von der Theorie der elliptischen Funktionen betrachten¹⁰⁴).

24. Reduktion von Gleichungen auf Normalformen. *Galois* hat gefunden, dass für $p = 5, 7, 11$ und nur für diese Werte der Primzahl $p \geq 5$ die Modulargleichung durch eine Gleichung von nur p tem Grade ersetzt werden kann; *Betti* hat den Beweis dafür ausgeführt¹⁰⁵). Für $p = 5$ ist die Gruppe der Gleichungen, um die es sich hier handelt, mit der Gruppe der geraden Vertauschungen von fünf Dingen holoeidrisch isomorph. So erscheinen spezielle Gleichungen 6. und 5. Grades, welche dieselbe Gruppe besitzen wie — nach Adjunktion einer Quadratwurzel — die allgemeine Gleichung 5. Grades. Durch Untersuchungen von *Kronecker*, *Hermite* und *Brioschi* ist bewiesen, dass die genannten speziellen Gleichungen als Normalgleichungen benutzt werden können, auf die man die allgemeine Gleichung 5. Grades zurückführt¹⁰⁶). *Klein* hat dann die sogenannte Ikosaeder-gleichung als Normalgleichung eingeführt¹⁰⁷).

1854; *Ch. Hermite*, sur la théorie des équations modulaires et la résolution de l’équation du cinquième degré, Paris 1859 (Par. C. R. 1859, 1. sém. p. 940, 1079, 1095 u. 2. sém. p. 15, 110, 141); *H. Schröter*, J. f. Math. 58 (1861), p. 378; *F. Müller*, de transformatione functionum ellipticarum diss. Berlin 1867; *L. Königsberger*, die Transformation, die Multiplikation u. die Modulargleichungen der elliptischen Funktionen, Leipzig 1868, vgl. insbesondere p. 141; *C. Jordan*, traité p. 344; *F. Müller*, über die Transformation vierten Grades der elliptischen Funktionen, Berlin, Jub. schrift der Realschule 1872; *F. Brioschi*, Par. C. R. 79 (1874), p. 1065 u. 80 (1875), p. 261; *R. Dedekind*, J. f. Math. 83 (1877), p. 265; *F. Klein*, Math. Ann. 14 (1879), p. 129, 15 (1879), p. 533, 17 (1880), p. 68, Vorlesungen über die Theorie der elliptischen Modulfunktionen, ausgearbeitet von *R. Fricke*, 2. Bd. (Leipzig 1892), p. 56. Vgl. II B 6 a und c.

103) *Jacobi*, J. f. M. 3 (1823), p. 308 (Werke 1, p. 261); *L. Kiepert*, J. f. M. 87 (1879), p. 199; *F. Klein*, Math. Ann. 14 (1879), p. 146, 15 (1879), p. 86; *A. Hurwitz*, Math. Ann. 18 (1881), p. 528; *W. Dyck*, ebendasselbst p. 507.

104) Man vgl. die nachher zu nennenden Arbeiten von *Kronecker* u. *Brioschi*, ferner *F. Klein*, Ikosaeder p. 147 ff., *A. Cayley*, Math. Ann. 30 (1887), p. 78 = Pap. 12, p. 493.

105) *Galois*, oeuvr. p. 27, 28; *E. Betti* a. a. O.; *C. Jordan*, traité p. 347; *F. Klein*, Math. Ann. 14 (1879), p. 417. [Vgl. I A 6, Anm. 63.]

106) *Ch. Hermite*, Par. C. R. 46 (1858), p. 508; *L. Kronecker*, ebenda p. 1150; Berl. Mon.-Ber. 1861, p. 609 und 1879, p. 220. *Hermite* und *Brioschi* haben ihre zer-

Für $p = 7$ ist die Gruppe der Modulargleichung — nach der Adjunktion einer Quadratwurzel — von der Ordnung 168. Es entstehen nun Gleichungen 8. und 7. Grades mit einer Gruppe der Ordnung 168.¹⁰⁸⁾ Jede Gleichung 7. und 8. Grades mit der betreffenden Gruppe lässt sich, wie *Klein* gezeigt hat, auf die Modulargleichung zurückführen¹⁰⁹⁾. Die Gleichungen 7. Grades, um die es sich hier handelt, besitzen diejenige Gruppe, welche die Funktion

$$x_0 x_1 x_3 + x_1 x_2 x_4 + x_2 x_3 x_5 + x_3 x_4 x_6 + x_4 x_5 x_0 + x_5 x_6 x_1 + x_6 x_0 x_2$$

der Wurzeln $x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ in sich überführt¹¹⁰⁾, woraus sich zugleich ergibt, dass diese Gruppe die hier auftretenden sieben Tripel von Wurzeln 0, 1, 3; 1, 2, 4 u. s. f. in einander überführt [I A 2, Nr. 10; I A 6, Note 67]. Auf diesen Tripelcharakter der betreffenden Gleichungen 7. Grades hat *M. Noether* zuerst aufmerksam gemacht¹¹¹⁾. Das rechnerische Detail, das erforderlich ist, um solche Gleichungen auf die von *Klein* eingeführten kanonischen Formen zu reduzieren, ist von *P. Gordan* entwickelt worden¹¹²⁾.

Die Trisektion der hyperelliptischen Funktionen erster Ordnung führt auf eine Gleichung, deren Gruppe einfach ist und die Ordnung $(3^4 - 1) 3^3 (3^2 - 1) 3$ besitzt. Man kann dabei die Gleichung so wählen, dass sie vom 27. Grade ist¹¹³⁾. *Klein* hat gezeigt, dass auf

965, 1073 u. 1866, 1. sém. p. 65, 157, 245, 715, 919, 959, 1054, 1161, 1213; *F. Brioschi*, Math. Ann. 13 (1878), p. 109. Man vgl. auch *C. Jordan*, traité p. 372 ff.; *H. Weber*, Algebra 2, p. 403 ff. Das Nähere s. I B 3 f, Nr. 9 ff.

107) Vgl. insbesondere Math. Ann. 12 (1877), p. 559 und die Vorlesungen über das Ikosaeder. Hier findet sich auch zur Gleichung 5. Grades weitere Litteratur. Im übrigen ist auf I B 3 f, Nr. 9 ff. zu verweisen.

108) *E. Betti* a. a. O.; *L. Kronecker*, Berl. Mon.-Ber. 1858, p. 287; hier hat Kronecker bereits die Vermutung ausgesprochen, dass alle Gleichungen 7. Grades mit der betreffenden Gruppe sich auf die Modulargleichung für die Transformation 7. Ordnung der elliptischen Funktionen reduzieren lassen; *Ch. Hermite*, a. a. O.; *E. Mathieu*, J. d. math. [2], 5 (1860), p. 24; *F. Klein*, Math. Ann. 14 (1879), p. 428.

109) Math. Ann. 15 (1879), p. 251. Allgemeine Gleichungen 6. u. 7. Grades hat *Klein*, Math. Ann. 28 (1887), p. 499 betrachtet.

110) *P. Gordan*, Math. Ann. 25 (1885), p. 459.

111) Math. Ann. 15 (1879), p. 89. Über Tripelgleichungen vgl. man noch *E. Netto*, Substitutionentheorie p. 220 ff. und *H. Weber*, Algebra 2, p. 342 ff.

112) Math. Ann. 20 (1882), p. 515; 25 (1885), p. 459.

113) *C. Jordan*, Par. C. R. 68 (1869), p. 868, traité p. 365; *A. Witting*, Math. Ann. 29 (1887), p. 157; *H. Maschke*, Math. Ann. 33 (1889), p. 317. Hinsichtlich der Transformation und der Modulargleichungen vgl. man *Ch. Hermite*, sur la théorie de la transformation des fonctions Abéliennes, Par. C. R. 1855, 1. sém. p. 249, 304, 365, 427, 485, 536, 704, 784; *L. Königsberger*, J. f. M. 64 (1865), p. 17; 67 (1867), p. 97 u. Math. Ann. 1 (1869) „ 161.

diese spezielle Gleichung 27. Grades jede andere Gleichung 27. Grades, welche dieselbe Gruppe besitzt, sich zurückführen lässt. Der Beweis wird auf eine andere Normalform des Trisektionsproblems gestützt¹¹⁴⁾. Zu den Gleichungen, die sich auf das genannte Problem zurückführen lassen, gehört auch diejenige, durch welche die 27 Geraden einer Fläche dritter Ordnung bestimmt werden¹¹⁵⁾.

25. Irreducible Gleichungen von Primzahlgrad. Für irreducible Gleichungen von Primzahlgrad, die auflösbar sind, hat *Galois* die Gruppen explicite aufgestellt¹¹⁶⁾. Es seien $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ die Wurzeln einer solchen Gleichung. Die Substitutionen der Form

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_p \\ x_{a+b} & x_{2a+b} & x_{3a+b} & \dots & x_{pa+b} \end{pmatrix},$$

in der a eine Zahl von 1 bis $p-1$ und b eine Zahl von 0 bis $p-1$ bedeutet, und in der die Indices bloss hinsichtlich des Restes betrachtet werden sollen, den sie bei der Division mit p ergeben, sind in der Zahl $p(p-1)$. Diese Substitutionen bilden eine Gruppe, welche als „lineare“ oder auch „metacyklische“ Gruppe bezeichnet wird¹¹⁷⁾. Diese Gruppe kann auch aus den beiden cyklischen Substitutionen $(x_1 x_2 x_3 \dots x_p)$ und $(x_1 x_g x_{g^2} x_{g^3} \dots x_{g^{p-2}})$ erzeugt werden, wobei g eine Primitivwurzel (Nr. 22) der Primzahl p bedeutet. Die Faktoren der Zusammensetzung für diese Gruppe sind Primzahlen. Die Gleichung ist also auflösbar, wenn ihre *Galois'sche* Gruppe mit der metacyklischen Gruppe übereinstimmt oder (Nr. 14) in ihr enthalten ist. Wenn andererseits eine irreducible Gleichung vom Primzahlgrad p auflösbar ist, so kann man ihre Wurzeln in einer solchen Ordnung mit x_1, x_2, \dots, x_p bezeichnen, dass nachher die oben aufgestellte metacyklische Gruppe die Gruppe der Gleichung enthält.

Ein anderer Satz, der auch von *Galois* herrührt, ergibt sich hieraus: Eine irreducible Gleichung von Primzahlgrad ist dann und nur dann auflösbar, wenn alle ihre Wurzeln sich in zwei bestimmten Wurzeln rational ausdrücken lassen¹¹⁸⁾. Ferner folgt, dass für solche

114) J. de math. [4], 4 (1888), p. 169; die Durchführung bei *H. Burkhardt*, Math. Ann. 41 (1892), p. 313, wo weitere Litteratur angegeben.

115) *C. Jordan* a. a. O. [Ann. 140].

116) *E. Galois*, ouvr. p. 47.

117) *C. Jordan*, traité p. 92; der Name „metacyklisch“ ist von *L. Kronecker* (Berl. Ber. 1879, p. 217) für diese Gruppen eingeführt, während *H. Weber* neuerdings mit dem Namen „metacyklisch“ die auflösbaren Gruppen bezeichnet (man vgl. Ann. 55). *J. A. Serret* hat in Par. C. R. 1859, 1. sér. p. 112, 178, 237 die lineare Gruppe genauer studiert [I A 6, Nr. 10].

118) *Compt. rend.* 48, 1859, 2. sér. p. 104; auch *E. Betti*, Ann. fis. mat. 2 (1851), p. 5. Eine

Gleichungen die Resolvente von *Lagrange* eine rationale Wurzel besitzt, was schon *Abel* ausgesprochen hatte¹¹⁹).

Abel hat für die Wurzeln der betrachteten Gleichungen die Formel

$$x = A + \sqrt[p]{R_1} + \sqrt[p]{R_2} + \cdots + \sqrt[p]{R_{p-1}}$$

gefunden, wobei R_1, R_2, \dots, R_{p-1} die Wurzeln einer Gleichung $p - 1^{\text{ten}}$ Grades bedeuten¹²⁰); *Kronecker* hat dazu bemerkt, dass diese Gleichung $p - 1^{\text{ten}}$ Grades eine einfache *Abel'sche* Gleichung sein muss¹²¹). Explícite Ausdrücke für die Koeffizienten einer auflösbaren Gleichung fünften Grades, die in der *Bring'schen* Form¹²²) $x^5 + ux + v = 0$ vorausgesetzt wird, haben *C. Runge*¹²³) und *G. P. Young*¹²⁴) gegeben. Fälle nichtauflösbarer Gleichungen fünften Grades sind von *C. Runge*¹²⁵) und *D. Selivanoff*¹²⁶) gegeben worden¹²⁷).

26. Sylow'sche Gleichungen. Bisweilen kann die Auflösbarkeit einer Gleichung schon an der Ordnung ihrer *Galois'schen* Gruppe erkannt werden. So sind, wenn p eine Primzahl bedeutet, alle Gleichungen auflösbar, deren Gruppe Γ von der Ordnung p^n ist [I A 6, Nr. 22].

andere Form des Kriteriums hat *L. Kronecker*, Berl. Ber. 1853, p. 369 gegeben, die *P. Bachmann*, Math. Ann. 18 (1881), p. 468 hergeleitet hat; vgl. auch *G. P. Young*, Am. J. of math. 6 (1883), p. 103 u. 7 (1885), p. 270.

119) *Abel*, oeuvr. 2, p. 223 ohne Beweis. Für den 5. Grad vgl. man die Herleitung von *E. Luther*, J. f. Math. 34 (1847), p. 244. Bei der Bildung dieser Resolvente adjungiert man die p^{ten} Einheitswurzeln.

120) A. a. O. p. 222; Bew. bei *C. J. Malmsten*, J. f. Math. 34 (1847), p. 46 und für den 5. Grad bei *E. Luther*, a. a. O. p. 250.

121) A. a. O. p. 368; hier ist zugleich eine nähere Bestimmung der Grössen R gegeben, und damit die hinreichende Bestimmung für die Wurzeln einer auflösbaren Gleichung p^{ten} Grades. Für $p = 5$ ist die in Frage stehende Formel von *Abel* in einem Briefe an *Crelle* aufgestellt worden, oeuvr. 2, p. 266; diese Formel hat *H. Weber* in den Marburger Ber. 1892, p. 3 bewiesen und in etwas berichtigt. Man vgl. auch *Kronecker*, Berl. Ber. 1856, p. 203.

122) Meletemata quaedam mathematica etc., quae praeside *E. S. Bring* modeste subjiicit *S. G. Sommelius*, Lund. 1786. Gewöhnlich wird diese Form nach *G. B. Jerrard* genannt. Man vgl. hierzu auch *C. J. Hill*, Stockholm Forh. 1861 u. *Klein*, Ikosaeder p. 143 [I B 3 f, Nr. 9].

123) Acta math. 7 (1885), p. 173. Vgl. auch *Weber*, Algebra 1, p. 624.

124) Am. J. of m. 7 (1885), p. 170; allgemeiner ebendasselbst 10 (1888), p. 99. Einzelne auflösbare Gleichungen höherer Grade sind schon früher von *R. Perrin*, S. M. F. Bull. 10 (1881/82), p. 139, 11 (1882/83), p. 61 gegeben worden.

125) Acta math. 7 (1885), p. 180.

126) S. M. F. Bull. 21 (1893), p. 97.

127) Mit auflösbaren primitiven Gleichungen beschäftigt sich ein Fragment von *Galois*, oeuvr. p. 50, wobei übrigens zu bemerken ist, dass *Galois* den Begriff der Primitivität etwas anders fasst, als jetzt üblich ist.

Dieses von *L. Sylow* gefundene Resultat¹²⁸⁾ ergibt sich aus der Betrachtung der ausgezeichneten oder invarianten Operationen der Gruppe. Eine Operation S ist invariant, wenn für jede Operation T der Gruppe

$$T^{-1}ST = S$$

ist, und jede Gruppe von der Ordnung p^n enthält stets invariante Operationen, auch abgesehen von der Identität. Alle invarianten Operationen von Γ mit Einrechnung der Identität bilden eine invariante Untergruppe Δ von der Ordnung p^m . Man kann nun für die Gleichung eine Resolvente (Nr. 10) bilden, deren Gruppe Γ/Δ von der Ordnung p^{n-m} ist, derart, dass die Adjunktion einer Wurzel der Resolvente die Gruppe der Gleichung auf Δ reduziert. Nach dieser Adjunktion besitzt also die Gleichung eine kommutative Gruppe und kann dann nach Nr. 20 durch Wurzelzeichen aufgelöst werden. Da man nun die Resolvente wieder ebenso behandeln kann wie die ursprüngliche Gleichung, wird schliesslich die Auflösung der Gleichung von Anfang an durch die Operationen der vier Spezies und durch Radizieren geleistet. Eine genauere Überlegung ergibt, dass man dabei die p^{ten} Einheitswurzeln berechnen und nach einander n Wurzeln mit dem Exponenten p ausziehen muss. Ist $p = 2$, so wird die Gleichung durch blossе Quadratwurzeln aufgelöst. Umgekehrt muss eine Gleichung, die so gelöst werden kann, eine Gruppe von der Ordnung 2^n besitzen. Ist die Gleichung zugleich irreducibel, so ist die Gruppe transitiv und die Ordnung der Gruppe durch den Grad teilbar (Nr. 6). Es muss also in diesem Falle der Grad eine Potenz von 2 sein¹²⁹⁾.

Eine irreducible Gleichung 3. Grades ist also nie durch Quadratwurzeln auflösbar. Eine Gleichung 4. Grades ist dann und nur dann durch Quadratwurzeln auflösbar, wenn ihre Resolvente 3. Grades eine rationale Wurzel hat¹³⁰⁾; dabei kann die eine oder die andere der in Nr. 17 genannten Resolventen genommen werden.

27. Casus irreducibilis der kubischen Gleichung. Sind die Wurzeln einer Gleichung alle reell, besteht der zu Grunde gelegte Rationalitätsbereich aus reellen Grössen, und kann die Gleichung bei dem angenommenen Rationalitätsbereich durch Quadratwurzeln aufgelöst werden, so könnten immer noch imaginäre Quadratwurzeln in

128) Math. Ann. 5 (1872), p. 588.

129) *J. Petersen*, om de Ligninger, der kunne løses ved Kvadratrod, Kjöbenhavn 1871. Hier findet sich für den genannten Satz ein elementarer Beweis, der nicht von gruppentheoretischen Hilfsmitteln Gebrauch macht.

130) Vgl. z. B. *K. Th. Vahlen*, Acta math. 21 (1897), p. 293.

die Lösung eingehen; man kann dann jedoch stets Darstellungen der Wurzeln durch reelle Quadratwurzeln finden. Liegt umgekehrt eine in einem reellen Rationalitätsbereich irreducible Gleichung vor mit lauter reellen Wurzeln, und kann eine der Wurzeln überhaupt durch reelle Radikale dargestellt werden, so ist die Gleichung durch *Quadratwurzeln* lösbar¹³¹⁾. Insbesondere kann also dann die Gleichung nicht vom 3. Grade sein. Hieraus folgt auch, dass keine Lösung der allgemeinen Gleichung 3. Grades existiert, die im Falle reeller Koeffizienten und positiver Diskriminante die in diesem Falle reellen drei Wurzeln durch Radikale in reeller Form lieferte¹³²⁾. Dass die Cardanische Formel (Nr. 17) in diesem Falle die drei reellen Wurzeln in imaginärer Form giebt, war längst bekannt, weshalb der Fall als *casus irreducibilis* bezeichnet wurde.

28. Konstruktionen mit Zirkel und Lineal. Bereits *Des-Cartes*¹³³⁾ hatte bemerkt, dass die Frage, ob eine geometrische Grösse mit Zirkel und Lineal konstruiert werden kann, hinauskommt auf die andere Frage, ob die Grösse sich durch Quadratwurzeln berechnen lässt. Die Konstruktion ist also jedenfalls unmöglich, wenn die Grösse einer irreducibeln Gleichung genügt, deren Grad einen ungeraden Faktor enthält. Hierauf beruht der Beweis dafür, dass gewisse vom Altertum auf uns gekommene Konstruktionsaufgaben nicht mit Zirkel und Lineal gelöst werden können, die Trisektion eines beliebigen Winkels und das Delische Problem, d. h. die Verdoppelung des Würfels [III A 2]. Es ergibt sich hieraus auch die Unmöglichkeit, den Kreis mit Zirkel und Lineal in n gleiche Teile zu teilen für andere Zahlen n als für diejenigen, welche *Gauss* behandelt hat, dass z. B. die Teilung in sieben Teile nicht möglich ist¹³⁴⁾.

29. Geometrische Gleichungen. Die allgemeine Kurve dritter Ordnung besitzt neun Wendepunkte; dabei liegt auf der Verbindungslinie von je zwei Wendepunkten immer ein dritter Wendepunkt¹³⁵⁾. Die Bestimmung der Wendepunkte hängt ab von einer Gleichung

131) *O. Hölder*, Math. Ann. 38 (1891), p. 312.

132) *V. Mollame*, Nap. Rend. (2) 4, 1890, p. 167; *O. Hölder* a. a. O.; *A. Kneser*, Math. Ann. 41 (1893), p. 344.

133) *La géométrie*, Leyde 1638, livre premier; deutsch v. *L. Schlesinger*, Berlin 1894.

134) *Gauss*, Werke 1, p. 412 ff., besonders p. 462; man vgl. über diese Probleme auch *F. Klein*, Vorträge über ausgewählte Fragen der Elementargeometrie, ausgearbeitet von *F. Tüger*, Leipzig 1895.

135) *J. V. Poncelet*, J. f. M. 8 (1832), p. 130; *O. Hesse*, J. f. M. 28 (1844), p. 68, 34 (1847), p. 193 = Werke p. 123, 137; *G. Salmon*, J. f. M. 39 (1850), p. 365 [III C 3].

9. Grades $f(\lambda) = 0$, wobei man λ so wählen wird, dass sich λ in den beiden Koordinaten eines Wendepunktes rational ausdrücken lässt und dass umgekehrt diese Koordinaten sich beide in λ ausdrücken lassen. Den neun Wendepunkten entsprechen die neun Wurzeln $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_9$. Gehören nun λ_1, λ_2 und λ_3 zu drei Wendepunkten, die auf einer Geraden liegen, so ist jede der drei Grössen $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ in den beiden anderen rational. Entsprechend den Beziehungen zwischen den Wendepunkten lässt sich nun für die neun Wurzeln $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_9$ ein System von Tripeln so bilden, dass jedes Wurzelpaar gerade in einem Tripel auftritt. Man kann aus neun Grössen, wenn man von einer Vertauschung unter diesen Grössen absieht, nur ein solches Tripelsystem bilden¹³⁶). Dieses wird, indem nur Indices geschrieben werden, in der Form

123, 145, 167, 189, 246, 259, 278, 348, 357, 369, 479, 568

dargestellt. Die *Galois'sche* Gruppe der Gleichung $f(\lambda) = 0$ besteht aus solchen Substitutionen, welche die Tripel des obigen Systems unter einander vertauschen. Die Gesamtgruppe der Substitutionen von dieser Eigenschaft ist von der Ordnung 432 und hat zu Faktoren der Zusammensetzung lauter Primzahlen¹³⁷). Die Gleichung $f(\lambda) = 0$, von der die neun Wendepunkte abhängen, ist also auflösbar. Dieses Resultat ist von *Hesse* auf etwas anderem Wege entdeckt worden¹³⁸).

Von anderen geometrischen Gleichungen, deren Gruppen studiert worden sind, mögen nur genannt werden die Gleichungen:

- 1) der 28 Doppeltangenten einer ebenen Kurve 4. Ordnung¹³⁹),
- 2) der 27 Geraden einer Fläche 3. Ordnung¹⁴⁰),
- 3) der 16 Geraden einer Fläche 4. Ordnung mit Doppelkegelschnitt¹⁴¹),
- 4) der 16 Knotenpunkte der *Kummer'schen* Fläche¹⁴²).

136) *E. Netto*, Substitutionentheorie p. 220 ff.; *H. Weber*, Algebra 2, p. 342 ff.

137) *C. Jordan*, traité p. 304. Man vgl. auch *Netto*, Substitutionentheorie p. 232 ff.; *Weber*, Algebra 2, p. 322 ff.

138) A. a. O.

139) *M. Noether*, Math. Ann. 15 (1879), p. 89, hat das Problem mit den Gleichungen 7. Grades, die Tripeleigenschaft, und mit den Gleichungen 8. Grades, die Quadrupeleigenschaft besitzen, in Zusammenhang gebracht [III C 3].

140) *Salmon* und *Cayley*, Camb. Dubl. M. J. 4 (1849), p. 118; s. *Cayley*, Math. Pap. 1, p. 445, 456; *J. Steiner*, J. f. Math. 53 (1856), p. 133 = Werke 2, p. 651; *C. Jordan*, traité p. 316. Man vgl. auch Nr. 24 und III C 6.

141) *Clebsch*, J. f. Math. 69 (1861), p. 229; *C. Jordan*, traité p. 309 [III C 6].

142) *E. Kummer*, Berl. Ber. 1864, p. 246; *Jordan*, J. f. Math. 70 (1869), p. 182, traité p. 313 [III C 6].

Keine dieser Gleichungen kann direkt durch blosse Radikale gelöst werden; die dritte kann es, wenn die Wurzeln einer Gleichung 5., die vierte, wenn die Wurzeln einer Gleichung 6. Grades schon bekannt sind¹⁴³). Das Studium der Gleichungsgruppen beruht hier auf den Eigenschaften geometrischer Konfigurationen, und es stellen sich zwischen den Gruppen der Gleichungen 1), 2) und 3) verschiedene Beziehungen heraus¹⁴⁴).

143) *C. Jordan*, traité p. 309 u. 315. Die letztere Reduktion auf eine Gl. 6. Grades hängt mit *Klein's* Theorie der sechs linearen Fundamentalkomplexe (*Math. Ann.* 2 [1870], p. 216) zusammen; adjungiert man einen dieser Komplexe, so bilden sich die ihm angehörigen Doppeltangenten der Kummer'schen Fläche auf eine F_4 mit Doppelkegelschnitt ab, und es entsteht aus dem vierten Problem des Textes das dritte; vgl. *Klein*, *Math. Ann.* 4 (1871), p. 357, zweite Anm. und die Citate bei *S. Lie*, *Math. Ann.* 5 (1872), p. 250, 251.

144) *E. Pascal*, *Ann. di mat.* (2) 20 (1892), p. 163, 269 u. 21 (1893), p. 85.

I B 3 e. GLEICHUNGSSYSTEME.

Der Inhalt dieses Artikels ist in die Artt. I B 1 b und I B 3 b mit aufgenommen worden.

IB 3f. ENDLICHE GRUPPEN LINEARER SUBSTITUTIONEN

VON

A. WIMAN

IN LUND.

Inhaltsübersicht.

1. Periodische Substitutionen.
2. Endliche binäre Gruppen.
3. Erweiterungen.
4. Algebraisch integrierbare lineare Differentialgleichungen 2. Ordnung.
5. Endliche ternäre Gruppen.
6. Algebraisch integrierbare lineare Differentialgleichungen höherer Ordnung.
7. Gruppen aus den regulären Körpern in höheren Räumen.
8. Invariante definite *Hermite'sche* Formen.
9. Erste Auflösung der Gleichungen 5. Grades.
10. Lösung durch Vermittlung der *Jacobi'schen* Gleichungen 6. Grades.
11. Satz betreffend die Möglichkeit von Resolventen mit nur einem Parameter.
12. Lösung durch die Ikosaederirrationalität.
13. Zurückführung der Gleichungen 5. Grades auf ein ternäres Formenproblem.
14. Auflösung durch elliptische Transformationsgrößen und hypergeometrische Funktionen.
15. Die allgemeinen algebraischen Formenprobleme.
16. Gleichungen 7. Grades mit einer Gruppe von 168 Substitutionen.
17. Kollineationsgruppen der elliptischen Normalkurven.
18. Gruppen aus der elliptischen Transformationstheorie.
19. Mit den Gleichungen 6. und 7. Grades isomorphe quaternäre Formenprobleme.
20. Reduktion der allgemeinen Gleichungen 6. Grades auf ein ternäres Formenproblem.
21. Satz über die allgemeinen Gleichungen höheren Grades.
22. Quaternäre Gruppe von 11520 Kollineationen.
23. Quaternäre und quinäre Gruppen aus der Dreiteilung der hyperelliptischen Funktionen.
24. Gruppen von eindeutigen Transformationen einer algebraischen Kurve in sich.
25. Endliche Gruppen von birationalen Transformationen.
26. Erweiterung auf unendliche diskontinuierliche Gruppen.

Litteratur.

Eine Reihe von Berührungspunkten mit dem folgenden Referat bietet

theorie, Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung 1, Berlin 1892 [franz. Ausg. von *H. Fehr*, Par. 1897; ital. Ausg. von *G. Vivanti*, Napoli 1899], nämlich p. 121–132 dortselbst, wo es sich um „Formen mit linearen Transformationen in sich“ handelt. Vgl. I B 2, Nr. 5.

Lehrbücher.

F. Klein, Vorlesungen über das Ikosaeder und die Auflösung der Gleichungen vom fünften Grade, Leipzig 1884.

H. Weber, Lehrbuch der Algebra 2, Braunschweig 1896, 2. Aufl. 1899.

1. Periodische Substitutionen. Die *endlichen Gruppen linearer Substitutionen* spielen jetzt für die *Algebra* und die Theorie der algebraisch integrierbaren *linearen Differentialgleichungen* sowie auch gerade bei den schönsten und merkwürdigsten *geometrischen Konfigurationen* eine besonders wichtige Rolle. Ehe noch eine eigentliche Theorie anfang, kannte man doch von den fraglichen Gruppen zwei ausgedehnte Arten: die *Gruppen von Buchstabenvertauschungen* und die *periodischen Substitutionen*. Über die letzteren hat *C. Jordan*¹⁾ den Satz ausgesprochen, dass sie, falls die Periode μ ist, auf die kanonische Form: $t_v = \omega_v u_v$ ($v = 1, \dots, n$), wo die ω_v μ^{te} Einheitswurzeln sind, gebracht werden können. Diese Bedingungen hat späterhin *R. Lipschitz*²⁾ so formuliert, dass die zugehörige charakteristische Determinante nur μ^{te} Einheitswurzeln als Wurzeln besitzt, und dass ihre sämtlichen Elementarteiler von der ersten Ordnung sein sollen [I B 2, Nr. 3]. Beweise für die Möglichkeit dieser Reduktion auf die kanonische Form haben *Lipschitz*²⁾ und *Kronecker* gegeben, sodann aber auch betreffend involutorische Substitutionen *Prym* und *Cornely* und für beliebige Periode *Rost*³⁾; die letzteren drei Verfasser haben dabei auch die zugehörigen Substitutionen durch eine geeignete Anzahl frei beweglicher Parameter rational dargestellt.

2. Endliche binäre Gruppen. Ohne noch sein Interesse dem Gruppenproblem zuzuwenden, gab *H. A. Schwarz* zuerst die zu den endlichen Gruppen einer Veränderlichen gehörigen fundamentalen Funktionen, sowie die zwischen diesen stattfindenden identischen Relationen [I B 2, Nr. 8]. Dies gelang ihm bei der Aufsuchung der algebraisch

1) J. f. Math. 84 (1878), p. 112.

2) Acta math. 10 (1887), p. 137.

3) *L. Kronecker*, Berl. Ber. 1890, p. 1081; *F. Prym*, Gött. Abh. 38³ (1892), p. 1; *A. Cornely*, Diss. Würzb. (1892); *G. Rost*, Diss. Würzb. (1892). Vgl. *H. Maschke*, Math. Ann. 50 (1898), p. 220 und *E. H. Moore*, ebenda p. 215.

integrierbaren hypergeometrischen Differentialgleichungen⁴⁾. Dabei betrachtete er die konforme Abbildung, welche der Quotient s zweier Integrale von der unabhängigen Variablen Z entwirft. Er fand so die positive Z -Halbebene auf ein Kreisbogendreieck abgebildet, wobei die analytische Fortsetzung sich durch Spiegelung an den drei Seiten ergab. Für eine algebraische Abhängigkeit zwischen s und Z erwies es sich somit (nach *Riemann'schen* Prinzipien [II B a]) als erforderlich, dass man auf diese Weise nur eine endliche Zahl von Gebieten erhielt⁵⁾.

Erst bei *F. Klein* findet man aber den Gesichtspunkt der endlichen Substitutionsgruppe, ebenso wie den Begriff und die Bildung des zugehörigen vollen Formensystems [I B 2, Nr. 6]. Ohne noch die besprochene Arbeit von *Schwarz* zu kennen, hat *Klein* direkt die *endlichen linearen Substitutionsgruppen einer Veränderlichen* und die zugehörigen invarianten Formen bestimmt⁶⁾. Dabei betrachtete er nach *B. Riemann* die Kugel als Trägerin der komplexen Veränderlichen $z = x + iy$ und reduzierte in dieser Weise die Aufgabe auf die Bestimmung der endlichen Gruppen von Drehungen im gewöhnlichen Raume; diese sind aber keine anderen als diejenigen, welche die *regulären Körper* in sich überführen⁷⁾. So erhielt er die folgenden 5 Lösungen: 1) die Wiederholung einer periodischen Substitution, die *cyklische Gruppe*; 2) die Erweiterung der vorigen durch Vertauschung der beiden bei ihr festen Punkte (Pole) oder die *Diedergruppe*; 3) die *Tetraedergruppe*; 4) die *Oktaedergruppe*; 5) die *Ikosäedergruppe*. Für die Gradzahlen der Gruppen ergab sich bez.: $n, 2n, 12, 24, 60$; doch so, dass die Gruppen, mit Ausnahme der cyklischen und der Diedergruppen mit ungeradem n , sich *homogen*⁸⁾ mit weniger als der doppelten

4) Zürich. Viertelj. (1871), p. 74; J. f. Math. 75 (1873), p. 292 — Ges. Abh. 1, p. 172, 211.

5) Die fraglichen Gebietseinteilungen werden (s. weiter unten) auf der Kugel durch die Symmetrieebenen der regulären Körper begrenzt. Der Zusammenhang mit den binären Gruppen beruht natürlich darauf, dass die Integrale nach der Umkreisung der singulären Punkte sich nach irgend einer solchen linear substituieren müssen; dass dies aber hier nach allen vorkommenden endlichen Gruppen möglich ist, kann man in gewisser Weise als zufällig betrachten.

6) Erl. Ber. 1874; Math. Ann. 9 (1875), p. 183.

7) Wozu noch das ebene reguläre n -Eck, das „Dieder“, hinzugerechnet wird. Über eine verwandte Untersuchung von *J. Steiner* s. III A 3. Wegen der Invarianz eines Punktes im Kugellinneren bei diesen endlichen Gruppen vgl. Nr. 8.

8) Durch das von *Klein* hier eingeführte Hilfsmittel der *homogenen Variablen* entstehen (s. weiter unten) statt der invarianten Funktionen invariante Formen, und es werden die Prozesse der *Invariantentheorie* verfügbar, um aus einer solchen Form andere zu berechnen.

Zahl von Substitutionen nicht schreiben lassen. Die Tetraedergruppe ist mit der alternierenden [I A 6, Nr. 7] und die Oktaedergruppe mit der symmetrischen Gruppe von 4 Dingen holoedrisch isomorph, entsprechend den bezüglichen Vertauschungen der 4 Geraden (= Würfel-diagonalen), die je eine Ecke des Tetraeders mit der gegenüberliegenden des Gegentetraeders verbinden. Von den letzteren Operationen führen vier jede der drei Oktaederdiagonalen in sich über; ihnen entspricht die *Vierergruppe*. Von grösserer Bedeutung für die Algebra ist es aber, dass die Ikosaedergruppe, als 5 gleichberechtigte Tetraedergruppen enthaltend, mit der Gruppe der geraden Vertauschungen von 5 Dingen holoedrisch isomorph [I A 6, Nr. 14] ist.

Betreffend die Bestimmung der *Formen*, welche bei den einzelnen Substitutionsgruppen bis auf einen Faktor invariant bleiben, erwies *Klein*, dass das allgemeinste bei der Gruppe sich geschlossen permutierende Punktsystem sich durch eine Gleichung $\kappa II + \kappa' II' = 0$ darstellen lässt. Die Anzahl der Punkte eines solchen Systems ist im allgemeinen gleich dem Grade N der Gruppe; doch giebt es für besondere Werte des Parameters $\kappa:\kappa'$ Systeme von geringerer Punktezahl. Dieselben sind bei den cyklischen die beiden Fixpunkte, bei den übrigen giebt es aber immer drei derartige Systeme, so dass die definierenden Formen, wie schon *Schwarz* gefunden hatte, durch eine identische Relation mit einander verknüpft sein müssen. Solche Systeme sind bei den Diedergruppen: die n Ecken des Dieders, die n Kantenhalbierungspunkte und das Polepaar; bei der Tetraedergruppe: die Ecken des Tetraeders und des Gegentetraeders sowie die Kantenhalbierungspunkte, welche die Ecken eines Oktaeders darstellen⁹⁾; bei der Oktaedergruppe: die Ecken des Oktaeders und des Polarwürfels und die 12 Kantenhalbierungspunkte; bei der Ikosaedergruppe: die Ecken des Ikosaeders und des reziproken Pentagondodekaeders sowie die 30 Kantenhalbierungspunkte. Für die Formen, welche die Ecken eines Tetraeders, Oktaeders oder Ikosaeders darstellen, fand *Klein*, dass die vierte Überschiebung $(f, f)_4$ identisch verschwindet. Diesen Satz vervollständigte *L. Wedekind*¹⁰⁾ dahin, dass es, von trivialen Fällen abgesehen, keine anderen binären Formen mit dieser Eigenschaft giebt.

Ohne Hülfe geometrischer Anschauungen bestimmte zuerst *P. Gordan*

9) Die Tetraederform ist eine biquadratische Form mit äquianharmonischem Doppelverhältniss, die Gegentetraederform ihre Hesse'sche Kovariante und die Oktaederform die Jacobi'sche Kovariante dieser beiden [I B 2, Nr. 7, Anm. 169]; in gleicher Weise hängen auch die Formen bei der Oktaeder- und der Ikosaedergruppe zusammen.

10) Hab.-Schr. Karlsruhe (1876).

die endlichen binären Gruppen¹¹⁾. Er benutzte dabei als Ausgangspunkt eine besondere Normalform der linearen Substitution und reduzierte die Frage auf die Lösung der Gleichung $1 + \cos \varphi_1 + \cos \varphi_2 + \cos \varphi_3 = 0$ durch Winkel, welche in rationalem Verhältnis zu π stehen¹²⁾.

3. Erweiterungen. Die linearen Substitutionsgruppen einer Veränderlichen können dadurch *erweitert* werden, dass man noch Operationen der folgenden Art: $z' = \frac{\alpha \bar{z} + \beta}{\gamma \bar{z} + \delta}$ hinzunimmt, wo \bar{z} den konjugiert imaginären Wert ($x - iy$) von z bezeichnet. Diese Substitutionen „zweiter Art“ sind geometrisch durch die Umlegung der Winkel charakterisiert, die auf der Kugel die Vertauschung der beiden geraden Erzeugendensysteme involviert. In jeder erweiterten Gruppe bildet selbstverständlich die ursprüngliche eine ausgezeichnete Untergruppe vom Index 2. Die Ikosaedergruppe, Oktaedergruppe, Tetraedergruppe und die Diedergruppen können stets durch *Spiegelungen an den Symmetrieebenen* der betreffenden Konfiguration erweitert werden; für die Tetraedergruppe und die Diedergruppen giebt es aber noch eine *zweite Erweiterung*, bei welcher die Operationen 2. Art das Tetraeder in das Gegentetraeder, bez. das reguläre n -Eck (= Dieder) in das durch die Seitenhalbierungspunkte gebildete Polygon überführen. Die cyklischen Gruppen können auf *dreierlei Weisen* erweitert werden: durch Spiegelungen an einer Meridianebene oder an einer Parallelebene oder endlich durch eine Drehung um die Axe von der Grösse $\frac{\pi}{n}$, kombiniert mit einer Spiegelung der letzteren Art. Von involutorischen Operationen der zweiten Art giebt es ausser der *Spiegelung* noch eine, nämlich die *Inversion* [III A 7] vom Centrum aus¹³⁾.

11) Math. Ann. 12 (1877), p. 28. Hieran anknüpfend A. Cayley, Math. Ann. 16 (1880), p. 260, 439; Quart. J. 27 (1895), p. 236 — Coll. Pap. II, p. 237; 13, p. 552.

12) Übersichtliches über die Gegenstände der Nummern 2–4 bei Klein, Vorl. üb. d. Ikosaeder I: Kap. 1, 2, 3, 5 (1884). In enger Beziehung zu Klein's ursprünglichen Arbeiten sind die endl. Gruppen einer Veränderlichen aus den endl. Bewegungsgruppen der elliptischen Ebene bei A. Clebsch–F. Lindemann, Vorlesungen üb. Geometrie 2¹, Abt. 3: 9–13 (Leipzig 1891), abgeleitet.

13) Bemerkenswert sind die durch die Symmetrieebenen der jedesmaligen Konfigurationen bewirkten Gebietseinteilungen (vgl. die Schwarz'schen Kreisbogendreiecke), wodurch man *Fundamentaltbereiche* [II B 6 c] für die fraglichen Gruppen erhält, so dass je zwei durch Operationen 2. Art aus einander hervorgehende Bereiche einen Fundamentaltbereich für die ursprüngliche Gruppe liefern (Figuren bei Klein–Fricke, Modulf. 1, I. Abschn. 3 [Leipzig 1890]). Diese Gebietseinteilungen können von dem ursprünglichen Gebiete her durch die

4. Algebraisch integrierbare lineare Differentialgleichungen

2. Ordnung. Die Bestimmung der allgemeinsten *algebraisch integrierbaren linearen Differentialgleichungen* mit rationalen Koeffizienten wurde der Gegenstand mehrerer Arbeiten von *L. Fuchs*¹⁵⁾; dabei wurde die Bedingung massgebend, dass die Integrale bei beliebiger Umkreisung der singulären Punkte sich nach irgend einer *endlichen Gruppe* substituieren müssen. Hieraus erschloss *Fuchs* die Existenz sog. *Primformen*, d. h. solcher Formen der Integrale $y_1, y_2, \dots y_n$, welche in geeigneter Potenz rationale Funktionen der unabhängigen Veränderlichen x darstellen. Da die Kovarianten der Primformen auch Primformen sein müssen, fand er die merkwürdige Eigenschaft, dass für die niedrigsten Primformen alle Kovarianten noch niedrigerer Ordnung verschwinden müssen¹⁴⁾. Für die Differentialgleichungen 2. Ordnung stellte nun *Fuchs* die Gradzahlen der möglichen niedrigsten Primformen auf¹⁵⁾. Beim Vergleich mit den niedrigsten Kovarianten der endlichen binären Gruppen fand *Klein*, dass *Fuchs'* Tafel zwar alle in Betracht kommenden, daneben aber noch überflüssige Fälle enthielt. Es wurde weiter von *Klein* nachgewiesen, wie durch Vermittlung der Differentialgleichung 3. Ordnung¹⁶⁾, welcher der Quotient $\eta = y_1 : y_2$ zweier Integrale genügt, aus den 5 Schwarz'schen hypergeometrischen Typen alle übrigen algebraisch integrierbaren linearen Differentialgleichungen 2. Ordnung durch einfache Transformation sich ableiten lassen¹⁷⁾.

(Werke II, p. 653) vor. Man vergleiche, wegen der in Rede stehenden Symmetrieverhältnisse *A. Schoenflies*, Krystallsysteme und Krystallstruktur (Leipz. 1891). Wir verweisen noch auf die arithm. Herleitung sowohl der ursp. als der erw. Gruppen (im Anschluss an die ternären eig. und uneig. orthog. Subst.) bei *H. Weber*, Algebr. 2: 7, 8 (1896).

14) Umgekehrt fand *Gordan*, Math. Ann. 12 (1877), p. 147, dass von triv. Fällen abgesehen, die einzigen binären Formen mit dieser Eigenschaft eben die Tetraeder-, Oktaeder- und Ikosaederform sind.

15) *Fuchs*, Gött. Nachr. (1875), p. 568, 612; J. f. Math. 81 (1876), p. 97; 85 (1878), p. 1. Weiteres über die Primformen bei *F. Brioschi*, Lomb. Rend. (2) 10 (1877), p. 48 und Math. Ann. 11 (1877), p. 401. An die *Fuchs'schen* Arbeiten schliesst sich naturgemäss die Abh. über die alg. Int. der Diff.-Gl. 2. Ordn. von *Th. Pepin*, Rom. Acc. Pont. 34 (1882), p. 243.

16) Von der Gestalt: $\eta'''/\eta' - \frac{3}{2} \eta''^2/\eta'^2 = r(x)$ [rat. Funkt. von x].

Cayley nennt bei seiner Behandlung der Schwarz'schen Polyederfunktionen (Cambr. Trans. 13 [1880], p. 5 = Pap. 11, p. 149) das linke Glied den „Schwarz'schen Differentialausdruck“.

17) *Klein*, Erl. Ber. 1876; Math. Ann. 11 (1876), p. 115; 12 (1877), p. 23; Diff.-Gl. 2. Ordn. (1894), p. 159 (Gött. autogr. Vorl.). Vgl. *E. Goursat*, Ann. Éc. norm. (3) 2 (1885), p. 37; J. d. math. (4) 3 (1887), p. 255.

5. Endliche ternäre Gruppen. Ein *allgemeiner Ansatz* zur Bestimmung der endlichen linearen Substitutionsgruppen bei beliebiger Variablenzahl rührt von *C. Jordan* her¹⁸⁾. Er betrachtet die verschiedenen in einer Gruppe G enthaltenen Scharen von gleichberechtigten Substitutionen und die mit den letzteren vertauschbaren Gruppen F, F_1, \dots , welche in G enthalten sind. Es ergibt sich so eine Gleichung zwischen dem Grad von G und den Gradzahlen von F, F_1, \dots , deren Diskussion auf eine endliche Zahl verschiedener möglicher Gruppen führt. Diese Methode hat *Jordan* für die binären und ternären Gruppen durchgeführt¹⁸⁾; aber schon bei den quaternären erhielt er eine so komplizierte Fundamentalgleichung¹⁹⁾, dass ihre Diskussion kaum möglich scheint. Um zu entscheiden, ob den in der obigen Weise erhaltenen „möglichen“ ternären Gruppen auch wirkliche Lösungen entsprechen, beschränkt sich *Jordan* zuerst auf die Bestimmung der wirklich vorkommenden *einfachen* [I A 6, Nr. 16] Gruppen und untersucht sodann, in welchen zusammengesetzten Gruppen solche einfache Gruppen als ausgezeichnete Untergruppen auftreten können, und steigt von diesen in ähnlicher Weise zu neuen zusammengesetzten Gruppen auf. Ausser solchen trivialen Gruppen, bei denen entweder *eine Gerade stets in sich übergeht* oder auch *drei Punkte sich geschlossen permutieren*²⁰⁾, erhielt *Jordan* nur 4 Lösungen, und unter diesen nur eine einfache Gruppe, nämlich die *ternäre Ikosaedergruppe*. Nach derselben substituieren sich $A_0 = y_1 y_2, A_1 = y_1^2, A_2 = -y_2^2$, wenn y_1, y_2 die binäre Ikosaedergruppe erleiden; es bleibt also ein Kegelschnitt $A = A_0^2 + A_1 A_2 = 0$ invariant²¹⁾. Von den anderen Gruppen war die wichtigste die von *Jordan* als „*Hesse'sche Gruppe*“ bezeichnete vom Grade 216, welche den syzygetischen durch eine C'_3 und ihre Hesse'sche Kurve bestimmten Büschel $\lambda_1 F'_3 + \lambda_2 H_3 = 0$ in sich überführt, und zwar in der Weise, dass F'_3 und H_3 nach einer *Tetraedergruppe* substituiert werden, durch welche je 12 Kurven des Büschels mit derselben absoluten Invariante in einander übergeführt werden. Die Hesse'sche Gruppe besitzt eine *ausgezeichnete* G_{72} , welche der

18) J. f. Math. 84 (1878), p. 89.

19) Nap. Atti 1880.

20) Vgl. über endliche ternäre Gruppen, bei denen ein Dreieck unverändert bleibt, *Maschke*, Am. J. 17 (1895), p. 168.

21) Dieser Kegelschnitt ist das Bild des binären Gebietes. Für die 6 Paare gegenüberliegender Ikosaederecken bilden die Pole der Verbindungsgeraden ein zehnfach *Brianchon'sches* Sechseck. Vgl. *A. Clebsch*, Math. Ann. 4 (1871), p. 33 I B 2, Nr. 19]. Das zehnfach *Brianchon'sche* Sechseck ist übrigens nur ein Zentralprojektion des Ikosaeders: vgl. *Klein*, Math. Ann. 13 (1877), p. 530.

innerhalb der Tetraedergruppe ausgezeichneten Vierergruppe zugeordnet ist; den 3 G_2 in der letzteren Gruppe entsprechen innerhalb der G_{216} 3 G_{36} ,²²⁾ und der Identität eine ausgezeichnete G_{18} , welche jede Kurve des Büschels invariant lässt. Gerade diese G_{72} und G_{36} liefern die übrigen von *Jordan* aufgezählten Gruppen²³⁾.

Indessen hatte *Jordan* bei dieser Diskussion die beiden interessantesten einfachen Gruppen von Kollineationen in der Ebene übersehen. Eine von diesen, die G_{168} , wurde alsbald von *Klein*²⁴⁾ durch Betrachtung der Transformation 7. Ordnung der elliptischen Funktionen abgeleitet [II B 6 a]. Die andere aber, die G_{360} , wurde erst von *H. Valentiner*²⁵⁾ aufgestellt. Die Methode von *Valentiner*, welcher die vorangehenden Arbeiten von *Jordan* und *Klein* nicht kannte, zielt ebenfalls auf die Aufstellung und Diskussion einer Fundamentalgleichung. Das Wesentliche in der Struktur der G_{360} , nämlich holoeidrischer Isomorphismus mit der alternierenden Gruppe von 6 Dingen, wurde zuerst von *A. Wiman*²⁶⁾ erkannt. Auf Grund dieser Eigenschaft enthält die G_{360} als Untergruppen sowohl zwei Systeme von je 6 Ikosaedergruppen²⁷⁾ als auch

22) Jede von diesen G_{36} ist die Kollineationsgruppe zweier harmonischen C_3 , welche von einander gegenseitig Hesse'sche Kurven sind.

23) Das vollständige Formensystem der G_{216} hat *Maschke* gegeben, Gött. Nachr. 1888, p. 78; Math. Ann. 33 (1890), p. 324. Dasselbe besteht aus 5 Formen, von denen drei die 4 Wendepunktsdreiseite, die 4 äquianharmonischen und die 6 harmonischen Kurven des Büschels darstellen; dieselben entsprechen den in Nr. 2, Anm. 9 aufgezählten Grundformen der binären Tetraedergruppe und sind auch durch eine ähnliche Identität mit einander verbunden. Die beiden übrigen definieren eine C_6 und die 9 harmonischen Polaren der Wendepunkte; das Quadrat der letzteren ist durch die C_6 , die äquianharmonischen und harmonischen C_3 genau so ausdrückbar, wie das *Weierstrass'sche* p' durch p , g_2 und g_3 [II B 6 a].

24) Erl. Ber. (1878); Math. Ann. 14 (1878), p. 438.

25) Kjöb. Skr. (5) 5 (1889), p. 64. Die G_{216} fehlt bei *Valentiner*.

26) Math. Ann. 47 (1896), p. 531. Es ist dort auch nachgewiesen, dass man in gleicher Weise das vollständige Formensystem der G_{360} erhält, wie *Klein* dasjenige der G_{168} abgeleitet hat (Math. Ann. 14 [1879], p. 448). Man geht bei der G_{168} (bez. G_{360}) von einer Grundform f_4 (bez. f_6) aus, bestimmt dann die Hesse'sche Kovariante X_6 (bez. X_{12}), dann die durch die Derivierten von X geränderte Hesse'sche Determinante Φ_{12} (bez. Φ_{30}) und endlich die Funktionaldeterminante Ψ_{21} (bez. Ψ_{45}) dieser drei Formen, welche letztere die harmonischen Perspektivitäten der bez. Gruppe darstellt und sich als Quadratwurzel einer ganzen rationalen Funktion der drei übrigen Formen ausdrücken lässt. Weitere Ausführungen über die G_{360} bei *F. Gerbaldi*, Pal. Rend. (1898, 1899); Zürich Congr.-Verh. 1898, p. 242; Math. Ann. 50 (1898), p. 473.

27) Diesen G_{60} sind Kegelschnitte zugeordnet, so dass je zwei Kegelschnitte desselben Systems sich nach äquianharmonischen Doppelverhältnissen schneiden, je zwei Kegelschnitte verschiedener Systeme einander doppelt berühren. Von

10 G_{36} . Die G_{60} und die G_{168} lassen sich auch homogen in 60 bez. 168 Substitutionen schreiben; die *homogene Darstellung* der 4 übrigen Gruppen erfordert mindestens dreimal so viele Substitutionen, also bez. 648, 216, 108, 1080.

6. Algebraisch integrierbare lineare Differentialgleichungen höherer Ordnung. *Jordan* hatte sich als eigentliches Ziel seiner Arbeit über die endlichen ternären Gruppen die Bestimmung der algebraisch integrierbaren linearen Differentialgleichungen gesetzt. Später hat man insbesondere den allgemeineren Typus von linearen Differentialgleichungen höherer Ordnung behandelt, zwischen deren Integralen homogene algebraische Relationen existieren²⁸⁾. Die algebraische Integrierbarkeit ist hier wesentlich davon abhängig, ob die durch jene Relationen dargestellten Gebilde eine endliche oder unendliche Gruppe von Kollineationen in sich besitzen. Aber auch in dem letzteren Falle giebt es algebraisch integrable Gleichungen, nämlich wenn sich die Integrale als homogene Formen $(n - 1)^{\text{ter}}$ Ordnung aus den Lösungen y_1, y_2 einer linearen Differentialgleichung 2. Ordnung darstellen²⁸⁾.

7. Gruppen aus den regulären Körpern in höheren Räumen. In gleicher Weise wie im dreidimensionalen Raume R_3 erhalten wir auch in höheren Räumen R_n aus den *endlichen Bewegungsgruppen* (mit oder ohne „Erweiterung“), welche die dort befindlichen *regulären Körper* in sich überführen, endliche lineare Substitutionsgruppen, und zwar auch in einem R_{n-1} , nämlich als *endliche orthogonale Substitutionsgruppen*²⁹⁾, da ja die Bewegungen das Gebilde $x_{n+1} = 0, \sum_1^n x_i^2 = 0$ invariant lassen. Dieses Gebilde lässt sich ein-eindeutig auf einen R_{n-2} abbilden; die auf diesen R_{n-2} übertragene Gruppe ist aber im allgemeinen nicht, wie im Falle $n = 3$, linear, sondern man muss für die Herstellung derselben auch quadratische Transformationen hinzu-

einem solchen Kegelschnittssysteme war *Gerbaldi* ursprünglich ausgegangen, *Tor. Atti* 17 (1882), p. 566.

28) Vgl. *Fuchs*, *Berl. Ber.* 1882, p. 703; *Acta math.* 1 (1883), p. 321; *Berl. Ber.* 1890, p. 469; *Goursat*, *Par. Soc. math. Bull.* 11 (1883), p. 144; *Par. C. R.* 1889, p. 232; *G. Halphen*, *Par. sav. [étr.]* 28, 1 (1883); *Acta math.* 3 (1883), p. 348; *H. Poincaré*, *Par. C. R.* 97 (1883), p. 984, 1189; *P. Painlevé*, *Par. C. R.* 104 (1887) p. 1829; 105, p. 68; 106 (1888), p. 535; *Brioschi*, *Ann. di mat.* 13 (1885), p. 1; *Ludw. Schlesinger*, *Diss. Berl.* 1887; *Lipm. Schlesinger*, *Diss. Kiel* (1888); *S. Lie*, *Leipz. Ber.* 43, p. 253 (1891); *G. Wallenberg*, *J. f. Math.* 111 (1893), p. 83; 113 (1894), p. 1; *Max Meyer*, *Diss. Berl.* 1893; *G. Fano*, *Rom. Linc. Rend.* (5), 4 (1895), p. 18, 51, 232, 292, 322.

29) Die „Erweiterung“ im R_{n-1} geschieht durch uneigentlich orthogonale Substitutionen von der Determinante -1 .

nehmen. Nun sind die regulären Körper in einem Raume von beliebiger Dimension n durch *J. Stringham* bestimmt worden³⁰): für $n = 4$ giebt es deren 6, für $n > 4$ aber nur 3, welche letzteren sich in 3 Reihen einordnen, deren Anfangsglieder bez. das Tetraeder, Oktaeder und der Würfel sind. Der erste Körper $K_n(n+1)$ ist durch $n+1$ $K_{n-1}(n)$ begrenzt; als Bewegungsgruppe hat man hier die alternierende und als ihre Erweiterung die symmetrische Vertauschungsgruppe dieser $n+1$ Grenzkörper. Die beiden übrigen Körper, $K_n(2^n)$ und $K_n(2n)$ sind zu einander reziprok und haben als Grenzkörper bez. $2^n K_{n-1}(n)$ und $2n K_{n-1}(2n-2)$; die letzteren $2n$ Grenzkörper stehen einander paarweise gegenüber, und die Bewegungsgruppe lässt sich durch Kombination der Gruppe, wo jedes Paar in sich übergeht, aber die Glieder einer geraden Zahl von ihnen sich vertauschen, mit der symmetrischen Vertauschungsgruppe der n Paare erzeugen³¹), ist also vom Grade $n! 2^{n-1}$; die Erweiterung entsteht dadurch, dass die Glieder auch einer ungeraden Zahl von Paaren vertauscht werden.

Im R_4 existieren noch drei regelmässige Körper: $K_4(24)$, $K_4(600)$ und $K_4(120)$, von denen die beiden letzteren zu einander reziprok sind. Dieselben sind bez. durch 24 Oktaeder, 600 Tetraeder und 120 Dodekaeder begrenzt, und die zugehörigen Bewegungsgruppen sind bez. von den Gradzahlen 576 und 7200. Eine analytische Grundlage der Theorie der regelmässigen vierdimensionalen Körper hat *Goursat* durch seine Untersuchungen über endliche Gruppen orthogonaler Substitutionen von vier Veränderlichen gegeben³²). Die letzteren Gruppen sind alle von ihm bestimmt³³), und zwar giebt es deren 32, welche jedes der Erzeugendensysteme der Fläche $\sum_1^4 x_i^2 = 0$ in sich überführen; werden aber jene Systeme vertauscht, kommen noch 19 hinzu³³).

Nach dem Vorgange von *Klein* bei den endlichen Gruppen einer Veränderlichen suchte *O. Biermann* die linearen Substitutionsgruppen

30) Am. J. of math. 3 (1880), p. 1.

31) Bei der Bewegungsgruppe müssen also die n Paare alle möglichen, die $2n$ Grenzkörper aber nur gerade Vertauschungen erleiden. Vgl. hierzu *A. Puchta*, Wien. Ber. 89 (1884), p. 806; 90 (1884), p. 168. Es mag bemerkt werden, dass diese Gruppen die endlichen Bewegungsgruppen in den betreffenden Räumen keineswegs erschöpfen.

32) Ann. éc. norm. (3) 6 (1889), p. 9.

33) Ebenda p. 50—79. Die Erzeugendensysteme werden natürlich nach binären Gruppen transformiert, und diese Gruppen müssen nach irgend einem Isomorphismus mit einander in Verbindung gesetzt werden.

von zwei komplexen Veränderlichen mit den Bewegungsgruppen der regelmässigen Körper im R_5 in Verbindung zu setzen, aber es zeigte sich dies nur für triviale Untergruppen möglich³⁴⁾.

Die Gruppen der regulären Körper (sowie überhaupt die endlichen linearen Substitutionsgruppen) können auch durch Hinzufügung dualistischer Transformationen erweitert werden, wie dies *E. Hess* für den dreidimensionalen Raum durchgeführt hat³⁵⁾.

8. Invariante definite Hermite'sche Formen. Bei der Übertragung einer komplexen Veränderlichen auf die *Riemann'sche* Kugel-
fläche werden den beiden Systemen geradliniger Erzeugenden die konjugiert imaginären Veränderlichen $z = x + iy$ und $\bar{z} = x - iy$ zugeordnet. Eine *definite Hermite'sche quadratische Form* von diesen Veränderlichen (mit konjugiert imaginären Koeffizienten) definiert dann nach bekannten Eigenschaften der Flächen 2. Grades, gleich Null gesetzt, eine reelle Ebene, welche mit der Kugel keine reellen Punkte gemein hat³⁶⁾. Aus der Invarianz der unendlich fernen Ebene bei den Gruppen der regulären Körper folgt also unmittelbar die Invarianz einer definiten Hermite'schen Form bei den endlichen Gruppen einer Veränderlichen. Für die *ternären Gruppen* haben *Picard* und *Valentiner* ähnliche invariante Formen hergestellt³⁷⁾. Den *allgemeinen Satz*, dass bei jeder endlichen linearen Substitutionsgruppe von beliebig vielen Veränderlichen mindestens eine definite Hermite'sche quadratische Form invariant bleibt, haben später fast gleichzeitig *Fuchs*, *Moore* und *Loewy*³⁸⁾ veröffentlicht. *Fuchs* gelangt zu dem Satze bei der Betrachtung der Fundamentalsubstitutionen der Integrale einer algebraisch integrierbaren linearen Differentialgleichung. *Moore* geht einfach von einer beliebigen definiten Hermite'schen Form aus und er-

34) Wien. Ber. 95 (1887), p. 523. Vom Gesichtspunkte der synthetischen Geometrie sind die regelmässigen Körper auch von anderen Verfassern (*Schlegel*, *Hoppe*, *Rudel*) untersucht worden [III A 3]. Vgl. die im Brill'schen Verlage (Darmstadt 1886) erschienenen Modelle von *V. Schlegel*.

35) Marb. Ber. 1894, p. 11.

36) Vgl. *J. Plücker*, J. f. Math. 34 (1847), p. 341 = Ges. Abh. 1, p. 417.

37) *É. Picard*, Par. Soc. math. Bull. 15 (1887), p. 152; *Valentiner*, Kjöb. Skr. (6) 5 (1889), p. 138, 218. Vgl. auch für einen Fall (die ternäre Ikosaedergruppe), wo *Picard* keine Form der gesuchten Art gefunden hatte, die sogleich zu citierenden Arbeiten von *Fuchs* und *Loewy*.

38) *Fuchs*, Berl. Ber. (9. Juli 1896), p. 753; *E. H. Moore*, Chic. Univ. Rec. (24. Juli 1896 vorgelegt der Chic. Math. Ges. 10. Juli); Math. Ann. 50 (1898), p. 213; *A. Loewy*, Par. C. R. (20. Juli 1896), p. 168. Wegen der gegenseitigen Beziehungen vergl. *Moore*, Math. Ann. 50, p. 214; *Loewy*, ebenda, p. 56; *Klein*, Deutsche M.-V. 5¹ (1896), p. 67.

hält dann in der Summe der aus ihr durch die Gruppe entstehenden Formen eine invariante Form der gesuchten Art.

9. Erste Auflösung der Gleichungen 5. Grades. Einen vollständigen Beweis für die Unmöglichkeit, die allgemeine Gleichung von höherem als dem 4. Grade durch Radikale aufzulösen, hat bekanntlich *N. H. Abel* gegeben³⁹). Von *Ch. Hermite* wurde zuerst nachgewiesen, dass man die allgemeine Gleichung 5. Grades auf solche Normalgleichungen, welche bei der Transformation 5. Ordnung der elliptischen Funktionen auftreten, zurückführen kann. Dies gelang ihm durch Untersuchung der *Modulargleichungen* zwischen $\sqrt[4]{x} = u$ und $\sqrt[4]{\lambda} = v$, wobei x den ursprünglichen *Legendre'schen* Modul und λ den aus ihm durch die Transformation hervorgehenden bezeichnen. Die Modulargleichungen bei der Transformation n^{ter} Ordnung, wo n eine ungerade Primzahl bedeutet, sind nach *C. G. J. Jacobi* und *Ad. Sohncke*⁴⁰) vom $(n + 1)^{\text{ten}}$ Grade sowohl in u als in v . Durch Untersuchung der Gruppen dieser Gleichungen hatte aber schon *Ev. Galois* erschlossen, dass dieselben für $n = 5, 7, 11$ Resolventen n^{ten} Grades besitzen müssen⁴¹). Für $n = 5$ wurde nun eine solche Resolvente von *Hermite* wirklich gebildet⁴²), und zwar erwies sich dieselbe von der Form $y^5 + ay + b = 0$, wobei a und b vom Parameter u abhängen. Andererseits hatte schon *E. S. Bring*⁴³) (und später *Jerrard*) die allgemeine Gleichung 5. Grades durch Benutzung von *Tschirnhausen-Transformation* [I B 2, Nr. 19] auf die obige spezielle Form reduziert, doch zunächst mit völlig beliebigen a und b ; es erwies sich aber, dass für die Reduktion der allgemeinen Bring'schen Gleichung auf die Hermite'sche Form und die Bestimmung des zugehörigen Parameters u nur aus Quadratwurzeln zusammengesetzte Irrationalitäten erforderlich sind. Hiernach geben also die Formeln von *Her-*

39) J. f. Math. 1 (1826), p. 65 = Oeuv. éd. *Sylow-Lie* p. 66 [I B 3 c, d, Nr. 18].

40) *Jacobi*, Fundamenta nova (1829) = Werke 1, p. 128; *Sohncke*, J. f. Math. 16 (1836), p. 97.

41) *Galois*, Brief an Chevalier (zuerst veröff. in Rev. enc. 1832). Der erste bekannte Beweis des Galois'schen Satzes ist wohl von *E. Betti*, Ann. mat. fis. 3 (1852), p. 74 [I A 6, Nr. 11; I B 3 c, d, Nr. 24].

42) Par. C. R. 46 (1858), p. 508. Vgl. *Ch. Briot-J. Cl. Bouquet*, Th. d. f. ell. (Par. 1875), p. 654; *H. Krey*, Ztschr. Math. Phys. 25 (1880), p. 129.

43) *Bring's* Beweis, welcher in einer von *Sommelius* verteidigten Promotionschrift (Lund 1786) erschien, wurde erst 1861 (durch *J. Hill*) beachtet. Das Resultat war inzwischen von *G. B. Jerrard* (Math. Researches, Bristol-London 1834) auf's neue gefunden worden. Vgl. *Hermite*, Par. C. R. 61, 62 (1865, 66) [I B 3 c, d, Nr. 24, Anm. 106]; *J. Rahts*, Math. Ann. 28 (1886), p. 34.

mite Ausdrücke für die Wurzeln der allgemeinen Gleichung 5. Grades durch die Wurzeln v der Modulargleichung. Die Rolle der elliptischen Funktionen bei dieser Lösung ist analog mit derjenigen der Logarithmen bei den binomischen Gleichungen, wie namentlich *Klein*⁴⁴⁾ hervorgehoben hat.

10. Lösung durch Vermittelung der Jacobi'schen Gleichungen 6. Grades. Die Transformationstheorie der elliptischen Funktionen liefert noch eine andere Art von Gleichungen, welche in der Theorie der Gleichungen 5. Grades eine Rolle spielen, nämlich die von *Jacobi* betrachteten *Multiplikatorgleichungen* [I B 3 c, d, Nr. 23; II B 6 a]⁴⁵⁾. Für diese fand er die merkwürdige Eigenschaft, dass die Quadratwurzeln ihrer $n+1$ Wurzeln sich mit Hilfe blös numerischer Irrationalitäten aus $\frac{n+1}{2}$ Bestandteilen folgendermassen linear zusammensetzen lassen:

$$(1) \sqrt{z_\infty} = \sqrt{(-1)^{\frac{n-1}{2}} n A_0}, \quad \sqrt{z_\nu} = A_0 + \varepsilon^\nu A_1 + \dots + \varepsilon^{\left(\frac{n-1}{2}\right)^2} \nu A_{\frac{n-1}{2}}$$

$$\left(\nu = 0, 1, \dots, n-1, \quad \varepsilon = e^{\frac{2i\pi}{n}} \right).$$

Die allgemeinste Jacobi'sche Gleichung 6. Grades wurde von *Brioschi* aufgestellt⁴⁶⁾ und erwies sich von der Gestalt:

$$(2) (z-A)^6 - 4A(z-A)^5 + 10B(z-A)^3 - C(z-A) + 5B^2 - AC = 0,$$

wobei A, B, C Funktionen in A_0, A_1, A_2 von den bezüglichen Gradzahlen 2, 6, 10 bedeuten. Um eine Resolvente 5. Grades herzustellen, ging *Brioschi* (dem Vorgange von *Hermite* bei den Modulargleichungen folgend) von der Substitution $y_\nu = (z_\infty - z_\nu)(z_{\nu+2} - z_{\nu+3})(z_{\nu+4} - z_{\nu+1})$ aus ($\nu + m$ nach dem Modul 5 genommen); er bemerkte aber, dass schon die $\sqrt{y_\nu}$ in den A rational sind und zu Gleichungen 5. Grades

Anlass geben⁴⁷⁾, nämlich für $x_\nu = \frac{y_\nu^{\frac{1}{2}}}{\sqrt[4]{5}}$:

$$(3) \quad x^5 + 10Bx^3 + 5(9B^2 - AC)x - D = 0,$$

wobei D die 4. Wurzel aus der durch 5^5 dividierten Diskriminante [I B 1 a, Nr. 20] der Jacobi'schen Gleichung darstellt. Die Multiplikatorgleichung, welche bei *Jacobi* den Ausgangspunkt der Theorie bildete, fand *Brioschi* durch die Bedingung $B = 0$ charakterisiert;

44) Man sehe etwa *Klein*, *Ikos.* (1884), p. 131.

45) *J. f. Math.* 3 (1829), p. 308 = *Werke* 1, p. 261.

46) *Ann. di mat.* (1) 1 (Juni 1858), p. 256.

47) *Ann. di mat.* (1) 1 (Sept. 1858), p. 326. Vgl. *Joubert* *Par. C. R.* 64 (1867), p. 1025, 1081, 1237.

ihre Resolvente (3) ist also eine *Bring'sche* Gleichung. Von noch grösserer Bedeutung wurde aber späterhin der von *Kronecker* zuerst betrachtete Fall $A = 0$.

Kronecker (und nach ihm *Brioschi*) haben das Problem in Angriff genommen⁴⁸), aus einer beliebigen Jacobi'schen Gleichung durch Tschirnhausentransformation neue abzuleiten. Es ergaben sich hier zwei Möglichkeiten: der eine Fall erledigte sich für den Grad 6 in allgemeinsten Weise durch die Substitution $\sqrt{z} = \lambda \sqrt{z} + \mu \frac{\partial \sqrt{z}}{\partial A} + \nu \frac{\partial \sqrt{z}}{\partial B}$; der andere Fall (durch die Ersetzung von ε durch ε^3 in den Formeln (1) charakterisiert) in entsprechender Weise, nachdem eine erste Lösung, etwa $Z = \frac{1}{z-A} + \frac{C}{5B^2 - AC}$, bekannt ist. Aus dem Umstande, dass der Ausdruck A eine quadratische Funktion von λ, μ, ν wird, zog man die Folgerung, dass letztere Grössen auf verschiedene Weisen ohne eine andere Irrationalität als eine Quadratwurzel so gewählt werden können, dass die *Bedingung* $A = 0$ erfüllt wird.

Von durchgreifender Bedeutung für die allgemeine Gleichung 5. Grades war die Entdeckung *Kronecker's*⁴⁹), dass man von der Gleichung nach Adjunktion der Quadratwurzel aus der Diskriminante als *rationale Resolventen Jacobi'sche Gleichungen 6. Grades* aufstellen kann. Dazu trat noch der Satz⁵⁰), dass man mit Hülfe nur einer hinzutretenden Quadratwurzel eine solche Resolvente mit $A = 0$ erhalten kann, welche nur einen wesentlichen Parameter $B^5 : C^3$ enthält und durch elliptische Funktionen lösbar ist. Weitere Entwicklungen über diese *Kronecker'sche* Lösungsmethode unternahm insbesondere *Brioschi*⁵¹); von ihm wurde ein allgemeines Bildungsgesetz für die Wurzeln der betreffenden Resolvente 6. Grades gegeben⁵²).

48) *Kronecker*, Berl. Ber. 1861, p. 222; *Brioschi*, Ann. di mat. (2), 1 (1867), p. 222; Nap. Atti (1866).

49) Par. C. R. 46 (Juni 1858), p. 1150.

50) Letzterer Satz hängt natürlich mit dem entsprechenden betreffend die Transformation der Jacobi'schen Gleichungen in solche mit $A = 0$ eng zusammen.

51) Lomb. Atti (Nov. 1858). Die zu den betreffenden Jacobi'schen Gleichungen gehörigen A_0, A_1, A_2 erwiesen sich als rationale Ausdrücke der Wurzeln der Gl. 5. Grades. Hierdurch wurde die Möglichkeit erkannt, letztere Gleichung nach Adjunktion der Quadratwurzel aus der Diskriminante in eine Gl. (3) (also mit verschwindenden Koeffizienten von x^4 und x^2) rational überzuführen, insbesondere nach Adjunktion einer neuen Quadratwurzel in eine solche mit $A = 0$. Die betreffende Tschirnhausentransformation hat *Hermite* (Par. C. R. 62 [1866]) [I B 3 c, d, Nr. 24, Anm. 106] durchgeführt. Vgl. auch ver-

11. Satz betreffend die Möglichkeit von Resolventen mit nur einem Parameter. Später machte *Kronecker*⁵³⁾ auf eine wesentliche Unterscheidung bei den Irrationalitäten, welche behufs der Reduktion algebraischer Gleichungen eingeführt werden, aufmerksam: diejenigen der ersten Art, die „*natürlichen*“ *Irrationalitäten* [I B 3 c, d, Nr. 7], hängen rational von den zu bestimmenden Wurzeln x ab, wie etwa die Quadratwurzel aus der Diskriminante; daneben stellen sich die „*accessorischen*“ *Irrationalitäten* [I B 3 c, d, Nr. 11], die irrationalen Funktionen der x sind⁵⁴⁾. Auf die Thatsache hinweisend, dass bei den durch Wurzelziehen lösbaren Gleichungen die accessorischen Irrationalitäten vermieden werden können, postuliert *Kronecker* das Gleiche für die Auflösung der höheren Gleichungen. Betreffend die allgemeinen Gleichungen 5. Grades stellte *Kronecker* jetzt die Behauptung auf, dass es *ohne Zuhilfenahme accessorischer Irrationalitäten unmöglich* sei, aus derselben *eine Resolvente mit nur einem wesentlichen Parameter* (wie die Jacobi'sche Gleichung mit $A = 0$) herzustellen. Nach *Kronecker* würde man sich also darauf zu beschränken haben, Resolventen mit zwei wesentlichen Parametern aufzustellen, wie etwa die allgemeinen Jacobi'schen Gleichungen mit den Parametern $B : A^3$ und $C : A^5$, und diese Resolventen der Auflösung der Gleichungen 5. Grades als Normalgleichungen zu Grunde zu legen.

Ein *Beweis des Kronecker'schen Satzes* über die Gleichungen 5. Grades wurde von *Klein* gegeben. Zuerst wurde nachgewiesen, dass, wenn eine Gleichung ohne Affekt [I B 3 b, Nr. 20; I B 3 c, d, Nr. 1] durch Adjunktion bloß natürlicher Irrationalitäten auf eine solche mit nur einem Parameter reduziert wird, die Wurzeln der letzteren bei Variation des Parameters im Raume der x eine rationale Kurve [III C 3] im Raume der x durchlaufen müssen. Den Punkten dieser Kurve ist ein Parameter λ eindeutig zugeordnet, welcher sich nach einem

schiedene Arbeiten von *Brioschi*, Par. C. R. 63 (1866), p. 685, 785; 73 (1871), p. 1470; 80 (1875), p. 753, 815; Ann. di mat. (2) 16 (1888), p. 181. Die fraglichen Transformationen von *Hermite* und *Brioschi* stehen andererseits in enger Beziehung zur Invariantentheorie der binären Formen 5. Grades. Eine Zusammenfassung der *Brioschi'schen* Untersuchungen über die Auflösung der Gleichungen 5. Grades findet man in Math. Ann. 13 (1878), p. 109.

52) Vgl. weiter *Cayley*, Math. Ann. 30 (1887), p. 78 = Pap. 12, p. 493, über die Fundamentalrelationen zwischen den \sqrt{z} der Jacobi'schen Gl. 6. Grades; J. f. Math. 113 (1894), p. 42 = Pap. 13, p. 473, über dieselben als Resolventen der Gleichungen 5. Grades.

53) Berl. Ber. 1861 = J. f. Math. 59 (1861), p. 306.

54) Die Benennungen „*accessorisch*“ und „*natürlich*“ sind von *Klein*. Vgl. „*Ikos.*“ p. 157.

Sätze von *J. Lüroth*⁵⁵⁾ als rationale gebrochene Funktion $\varphi : \psi$ der Wurzeln der letzteren (und also auch der ursprünglichen) Gleichung ausdrücken lassen muss. Bei den Wurzelvertauschungen müssen also φ und ψ sich nach einer isomorphen binären Gruppe substituieren; aber es giebt (Nr. 2) *keine homogene binäre* (dagegen wohl eine homogene ternäre) Gruppe, welche mit der alternierenden Gruppe von 5 Dingen *holoedrisch isomorph* ist. Hiermit ist aber auch der Satz bewiesen⁵⁶⁾.

12. Lösung durch die Ikosaederirrationalität. Der Beweis des Kronecker'schen Satzes war nur ein Schlussresultat der Bestrebungen von *Klein* und *Gordan*, die Gleichungen 5. Grades mit der Theorie des Ikosaeders in Verbindung zu setzen. Zunächst griff *Klein* die Aufgabe an⁵⁷⁾: wenn die fundamentale Kovariante f_{12} und also auch H_{20} und T_{30} als Funktionen von z_1, z_2 gegeben sind (f_{12} nicht in kanonischer Form⁵⁸⁾), sondern nur der definierenden Identität $(ff)_4 = 0$ genügend), die Gleichung $f_{12} = 0$ in 6 quadratische Faktoren zu spalten, welche den 6 Paaren einander gegenüberliegender Ikosaederecken entsprechen. Es wurden sowohl die nötige Gleichung 6. Grades als ihre Resolvente 5. Grades aufgestellt. Hier trat nun eine Übereinstimmung mit den Formeln von *Kronecker* und *Brioschi* hervor, indem jene Gleichung 6. Grades im wesentlichen sich als eine Jacobi'sche Gleichung mit $A = 0$ erwies.

Später nahmen aber die Arbeiten von *Klein* und *Gordan* die umgekehrte Richtung. Die durch die Gleichung 60. Grades $H^3(z) : 1728 f^5(z) = Z$ ⁵⁹⁾ definierte Ikosaederirrationalität $z = z_1 : z_2$ wurde neben den Radikalen als *neue selbständige algebraische Irrationalität* betrachtet, und zwar als die einfachste mögliche. Durch die Ikosaeder-

55) Math. Ann. 9 (1875), p. 163 [I B 1 c, Nr. 22].

56) *Klein*, Erl. Ber. (Jan. 1877); Math. Ann. 12 (1877), p. 559; Vorl. üb. d. Ikos. (1884), p. 254. Auf Grund der Eigenschaften der homogenen binären Gruppen gilt ein ähnlicher Satz schon für die Gl. 4. Grades; weil aber hier die alternierende Gruppe nicht einfach ist, reichen jetzt *Partialresolventen* mit nur einem Parameter (nämlich binomische Gleichungen) aus. Einen mehr elementar gehaltenen Beweis gab später *Gordan*, Math. Ann. 29 (1887), p. 318.

57) Erl. Ber. (Juli 1875); Math. Ann. 9 (1875), p. 183.

58) Die gewöhnlich angewandten kanonischen Formen sind:

$f_{12} = z_1 z_2 (z_1^{10} + 11 z_1^5 z_2^5 - z_2^{10})$; $H_{20} = -(z_1^{20} + z_2^{20}) + 228(z_1^{15} z_2^5 - z_1^5 z_2^{15}) - 494 z_1^{10} z_2^{10}$; $T_{30} = z_1^{30} + z_2^{30} + 522(z_1^{25} z_2^5 - z_1^5 z_2^{25}) - 10005(z_1^{20} z_2^{10} + z_1^{10} z_2^{20})$ mit der Identität $T^2 + H^3 - 1728 f^5 = 0$.

59) Hier ist f in kanonischer Form vorausgesetzt. Neben der Ikosaedergleichung stellt sich das *Formenproblem*: z_1 und z_2 für gegebene numerische Werte von f, H und T , welche der Identität $T^2 + H^3 - 1728 f^5 = 0$ genügen, zu bestimmen [I B 2, Nr. 11, Anm. 219].

substitutionen werden nämlich die 60 Wurzeln jener Gleichung rational durch eine beliebige von ihnen ausgedrückt; die fragliche Gleichung ist also *ihre eigene Galois'sche Resolvente*, falls man nämlich die 5. Einheitswurzeln, welche ja bei den Ikosaedersubstitutionen auftreten, adjungiert [I B 1 c, Nr. 2; I B 3 c, d, Nr. 5], und nach unserer Aufzählung der binären Gruppen kann es keine andere neue Irrationalität geben, welche nur auf ein binäres Problem führt⁶⁰). Das Prinzip, nach welchem die genannten Autoren jetzt die Theorie entwickelten, war dieses, dass *die Gleichungen 5. Grades durch die Ikosaederirrationalität ihre naturgemässe Lösung finden*.

Unter den verschiedenen Resolventen 5. Grades der Ikosaedergleichung zog *Klein* insbesondere die *Hauptresolvente* in Betracht, welche durch die Substitution $y_v = m v_v + n u_v v_v$, wo $u_v = 12 t_v f^2 : T$, $v_v = 12 W_v f : H$, und t_v und W_v die zu den Tetraederuntergruppen gehörigen Oktaeder- und Würfelformen darstellen. Hier wurde es besonders wichtig, dass einerseits in der Hauptresolvente die vierte und dritte Potenz der Unbekannten gleichzeitig fehlen, andererseits *jede Hauptgleichung 5. Grades, $y^5 + a y^2 + b y + c = 0$, direkt mit einer Hauptresolvente zu identifizieren* ist, wobei m , n und Z sich rational durch a , b , c und die Quadratwurzel aus der Diskriminante ausdrücken lassen⁶¹).

Hiernach ergibt sich eine *erste Auflösungsmethode der allgemeinen Gleichung 5. Grades*: zuerst die Gleichung durch Tschirnhausentransformation auf eine *Hauptgleichung* zu reduzieren, wozu eine nach dem Kronecker'schen Satze nicht zu vermeidende accessorische Quadratwurzel erforderlich ist; dann nach Adjunktion der Quadratwurzel aus der Diskriminante eine *Ikosaedergleichung als Resolvente* aufzustellen, endlich durch die zugehörige Ikosaederirrationalität die Wurzeln der Gleichung 5. Grades auszudrücken. *Klein* stellt die ganze Sache in geometrischem Gewande dar⁶²): die Wurzeln, für welche von vornherein

60) Nach den Untersuchungen von *O. Hölder* (Math. Ann. 40 [1892], p. 55) und *F. N. Cole* (Amer. J. 14 [1892], p. 378) sind auch (von cykl. Gr. abges.) die im bin. und tern. Gebiete auftretenden G_{60} , G_{168} und G_{360} die einfachen Gruppen von den niedrigsten Gradzahlen [I A 6, Nr. 22].

61) Die Hauptresolvente wurde zuerst von *Klein*, Math. Ann. 12 (1877), p. 525, mitgeteilt. Direkter Vergleich der Hauptresolvente mit der Hauptgleichung zuerst bei *L. Kiepert*, Gött. Nachr. (Juli 1878, p. 424); Ann. di mat. (2), 9, p. 119; J. f. Math. 87 (1878), p. 114.

62) Die Deutung von Wurzelvertauschungen durch Kollineationen von *Klein* findet sich schon Math. Ann. 4 (1871), p. 346. Die Verbindung der Auflösung der Gl. 5. Grades mit der Ikosaedertheorie von *Klein* zuerst Erl. Ber. (Nov. 1876, Jan. und Juli 1877): Math. Ann. 12 (1877) p. 503. Vgl. dazu besonders *Klein*,

$\sum x = 0$, werden als überzählige homogene Koordinaten eines Punktes im R_3 betrachtet; die Tschirnhausentransformation, welche den Koeffizienten von x^3 wegschaffen soll, wird als die Aufsuchung eines kovarianten Punktes y auf der *Hauptfläche* $\sum x^2 = 0$ gedeutet, was nicht rational, sondern nur vermittelt einer (accessorischen) Quadratwurzel geschehen kann; die beiden Erzeugendensysteme der Hauptfläche gehen bei den geraden Vertauschungen der x jedes in sich über, werden aber bei den ungeraden vertauscht; durch die Adjunktion der Quadratwurzel aus der Diskriminante wird also ein erstes von diesen ausgewählt, und eben die 60 Erzeugenden erster Art, welche durch die 60 bei den geraden Vertauschungen der x sich permutierenden Punkte y hindurchgehen, hängen nach geeigneter Fixierung eines Parameters λ von der aufzustellenden Ikosaedergleichung ab^{62a)}).

Gordan befriedigte die Hauptgleichung direkt durch $y_\nu = \varepsilon^{4\nu} \lambda_1 \mu_1 + \varepsilon^{3\nu} \lambda_2 \mu_1 + \varepsilon^{2\nu} \lambda_1 \mu_2 + \varepsilon^\nu \lambda_2 \mu_2$, wo $\varepsilon = e^{\frac{2i\pi}{5}}$, $\nu = 0, 1, 2, 3, 4$. Sein Verfahren gestaltet sich übrigens vermöge der geometrischen Einkleidung von *Klein* folgendermassen⁶³⁾: für beide Arten von Erzeugenden⁶⁴⁾ werden geeignete homogene Parameter $\lambda_1, \lambda_2; \mu_1, \mu_2$ eingeführt; durch diese werden als doppelt binäre Formen zuerst die Koeffizienten a, b, c und die Quadratwurzel ∇ aus der Diskriminante der Hauptgleichung, dann aber auch die in der Hauptresolvente 5. Grades der Ikosaedergleichung auftretenden Konstanten m_1, n_1 und Z_1 ⁶⁵⁾ ausgedrückt;

Vorl. üb. d. Ikos. und d. Aufl. d. Gl. 5. Grades (1884): Referat über die früheren Methoden (2) 1; Resolventenbildung für die Ikosaedergl. und ihre transcendente Auflösung (1) 3, 4, 5; Lösung der Gl. 5. Grades durch das Ikosaeder (2) 2, 3, 5. Ein Referat dieser Arbeit von *F. N. Cole*, Amer. J. of math. 9 (1886), p. 45; *F. Giudice*, Tor. Atti 28 (1893), p. 664. Für den Beweis des Kronecker'schen Satzes und die Lösung der Gl. 5. Grades durch die Hauptresolvente vgl. weiter *H. Weber*, Algebra (2) 13 (1896).

62a) Man setzt etwa:

$$\lambda = -\frac{p_1}{p_2} = \frac{p_3}{p_4}, \quad \mu = \frac{p_1}{p_3} = -\frac{p_2}{p_4}, \quad \text{wo } p_\nu = y_0 + \varepsilon^{4\nu} y_1 + \varepsilon^{3\nu} y_2 + \varepsilon^{2\nu} y_3 + \varepsilon^\nu y_4.$$

63) *Gordan*, Erl. Ber. (Juli 1877); Math. Ann. 13 (1878), p. 375. Vgl. auch *Klein*, Vorl. über das Ikosaeder 2, Kap. 3 (1884). *Gordan* hat (Math. Ann. 13 l. c. § 3 ff.) das volle System einer gewissen invarianten doppelt-binären Form aufgestellt, wenn $\lambda_1, \lambda_2; \mu_1, \mu_2$ bei isomorpher kontragredienter Zuordnung eine Ikosaedergruppe erleiden [I B 2, Nr. 2, Anm. 30].

64) Wie oben angedeutet, hatte *Klein* schon früher die Hauptgleichung mit Hilfe der Erzeugenden auf eine Ikosaedergleichung zurückgeführt; vgl. Erl. Ber. (Nov. 1876).

65) Statt Z_1, m_1, n_1 erhalten wir, wenn ∇ sein Vorzeichen ändert, Z_2, m_2, n_2 ; dadurch geht man von der Ikosaedergleichung für $\lambda = \lambda_1 : \lambda_2$ zu derjenigen für $\mu = \mu_1 : \mu_2$ über.

vermittelt zweckmässiger Rechnungen gelingt es nun, m_1, n_1 und Z_1 rational durch a, b, c und ∇ herzustellen⁶⁶⁾.

Nun wir nach Adjunktion von ∇ für die Hauptgleichung eine Ikosaedergleichung als Resolvente erhalten haben, ist es einleuchtend, dass wir die letztere ohne neue Irrationalität durch Tschirnhausentransformation in jede rationale Resolvente 5. Grades der bez. Ikosaedergleichung überführen können, also auch durch Variation von m und n in unendlich viele Hauptgleichungen. Um sie aber in eine *Bring'sche Gleichung* zu transformieren (falls man hierauf Wert legen sollte), ist die Lösung einer kubischen Hülfsleichung für $m:n$ (also eine *neue accessorische Irrationalität*) erforderlich, welche geometrisch als die Aufsuchung eines Schnittpunktes einer Erzeugenden 1. Art mit der Diagonalfäche [III C 6] $\sum x^3 = 0$ gedeutet wird⁶⁷⁾.

13. Zurückführung der Gleichungen 5. Grades auf ein ternäres Formenproblem. Klein giebt noch eine *zweite Lösung der allgemeinen Gleichungen 5. Grades durch das Ikosaeder*⁶⁸⁾, die unmittelbar an die Theorie von Kronecker und Brioschi (Nr. 10) anknüpft, nur dass statt der Jacobi'schen Gleichungen 6. Grades das „*Problem der A*“, d. h. das Formenproblem der ternären Ikosaedergruppe, als der Mittelpunkt der ganzen Theorie betrachtet wird; dies Problem besteht darin, für gegebene Werte der Kovarianten A, B, C, D , welche bez. von den Gradzahlen 2, 6, 10, 15 sind, und von denen D^2 eine gegebene ganze rationale Funktion der drei anderen darstellt, A_0, A_1, A_2 zu bestimmen. Die Jacobi'schen Gleichungen 6. Grades (und Analoges gilt für die höheren Jacobi'schen Gleichungen) sind in der That nichts anderes als Resolventen dieses Problems, vorausgesetzt nämlich, dass nicht nur die Quadratwurzel, was immer der Fall ist, sondern auch die vierte Wurzel D aus der Diskriminante rational bekannt ist⁶⁹⁾; letzteres trifft aber auch immer zu, wenn jene Gleichungen

66) Behandlung der Gleichungen 5. Grades unter Anlehnung an die Klein-Gordan'sche Theorie von W. Heymann, Ztschr. Math. Phys. 39 (1894), p. 162, 193, 257, 321; 42 (1897), p. 81, 113. Es treten hier in den Vordergrund zwei koordinierte „ η -Resolventen“, d. h. zwei Hauptgleichungen, deren Wurzeln durch die Relation $\eta_1 \eta_2 = \eta_1 + \eta_2$ einander zugeordnet sind. Jede Hauptgleichung lässt sich dann nach Adjunktion von ∇ durch eine Substitution $y = p\eta_1 + q\eta_2$ in ein solches Paar zerfallen. Zweck ist hier die Lösung durch transcendente Funktionen.

67) Vgl. Gordan, Math. Ann. 13 (1878), p. 400; Klein, Vorl. Ikos. (1884), p. 207, 244.

68) Erl. Ber. (Nov. 1876); Math. Ann. 12 (1877), p. 503 (insbes. Abschn. 2); Vorl. Ikos. 2, Kap. 4, 5 (1884).

69) Die Transformation der Jacobi'schen Gleichungen in andere solche wird hier von der Ermittlung von Funktionen B_0, B_1, B_2 abhängig, welche

als Resolventen von Gleichungen 5. Grades erhalten sind⁷⁰⁾. Für die Punkte des Fundamentalk Kegelschnitts $A = A_0^2 + A_1 A_2 = 0$ lässt sich nun durch die Substitutionen $A_0 = \lambda_1 \lambda_2$, $A_1 = \lambda_1^2$, $A_2 = -\lambda_2^2$ ein Parameter $\lambda = \lambda_1 : \lambda_2$ einführen; die Formen B , C , D gehen dann in die binären Ikosaederformen f_{12} , H_{20} , T_{30} über. Wenn $A = 0$, löst sich also das Problem der A durch eine Ikosaedergleichung. Um aber zu einem beliebigen Punkte der A -Ebene einen kovarianten Punkt von $A = 0$ (etwa auf der Polargeraden des Punktes) aufzusuchen, ist immer die Lösung einer quadratischen Gleichung erforderlich. Hiernach ergibt sich die folgende Lösungsmethode der Gleichungen 5. Grades: *zuerst* wird nach Adjunktion der Quadratwurzel aus der Diskriminante ein Gleichungssystem der A substituiert; *dann* aber wird nach Adjunktion einer accessorischen Quadratwurzel eine Ikosaedergleichung als Resolvente aufgestellt.

Doch sind die beiden Lösungsmethoden der Gleichungen 5. Grades durch das Ikosaeder *nicht wesentlich verschieden*. In der That lässt sich auch bei der ersten Lösung die Einführung der accessorischen Quadratwurzel verschieben. Es werden da etwa durch eine zu dem Punkte x kovariante Gerade zwei Punkte der Hauptfläche bestimmt. Wir brauchen jetzt nicht sogleich den einen von diesen auszuwählen, sondern können zuerst für die symmetrischen Funktionen

$$\left(-\lambda_1 \lambda_1', -\frac{1}{2}(\lambda_1 \lambda_2' + \lambda_2 \lambda_1'), \lambda_2 \lambda_2'\right)$$

der zugehörigen Erzeugenden erster Art λ , λ' ein Gleichungssystem der A aufstellen⁷¹⁾.

14. Auflösung durch elliptische Transformationsgrößen und hypergeometrische Funktionen. Entwicklungen für die Wurzeln der

sich isomorph (kogredient oder kontragredient) mit den A substituieren. Vgl. Klein, Vorl. Ikos. (1884), p. 227.

70) Die Wurzel ausdrücke der Jacobi'schen Gleichungen stellen zusammen ein zehnfach Brianchon'sches Sechseck dar, und reciprok die Pole mit Bezug auf $A = 0$ ein eben solches Sechseck. Letztere Punkte bilden nach Clebsch [Math. Ann. 4 (1871), p. 331] die Fundamentalpunkte bei der ebenen Abbildung

der Diagonalfäche $\sum_1^5 x^3 = 0$, $\sum_1^5 x = 0$. Vgl. weiter über diese Konfiguration und ihre Beziehung zu den Gl. 5. Grades Clebsch-Lindemann, Vorl. Geom. 2¹ (1891), p. 593.

71) Klein, Vorl. Ikos. p. 239. Wie man aus der Hauptgleichung unmittelbar durch Tschirnhausentransformation die Brioschi'sche Resolvente der Jacobi'schen Gleichungen mit $A = 0$ (Nr. 10, Gl. 3) erhält, hat Gordan gezeigt, J. d. math. (4) 1 (1885), p. 455; Math. Ann. 28 (1886), p. 152.

allgemeinen Gleichung 5. Grades durch elliptische Funktionen bieten sich durch die von *Hermite* und *Kronecker* (Nr. 9, 10) geleistete Zurückführung der Gleichung auf die elliptischen Transformationsgleichungen 5. Stufe. Wie *Klein* bemerkt, bewährt auch hier die Thatsache, dass die Herstellung der *Hermite'schen* Normalgleichung einen grösseren Aufwand von accessorischen Irrationalitäten erfordert, ihre Bedeutung, indem sich die *Kronecker'sche Resolvente*, wie *Kiepert* und *Klein* darge-
 than haben, schon als rationale Transformationsgleichung ergibt, wenn man mit den *rationalen Invarianten* g_2 , g_3 und Δ operiert, die *Hermite'sche* aber an die Anwendung des *Legendre'schen Moduls* κ^2 gebunden ist; für die rationale Herstellung der *Hermite'schen* Resolvente ist die Adjunktion der Irrationalität erforderlich, durch die κ^2 mittels $g_2^3 : \Delta$ ausgedrückt wird⁷²). Die *Ikosaederirrationalität* ist aber die *Hauptfunktion*, durch welche alle zur 5. Stufe rational gehörigen Modulfunktionen rational dargestellt werden können; das bezügliche *Transformationsproblem* ist also auch auf die Lösung einer *Ikosaeder-
 gleichung* $H_{20}^3 : 1728 f_{12}^5 = Z = g_2^3 : \Delta$ zurückgeführt. In gleicher Beziehung zu den elliptischen Transformationsproblemen 2., 3. und 4. Stufe stehen bez. die Diedergruppe D_3 , die Tetraedergruppe und die Oktaedergruppe⁷³).

Weil andererseits nach *Schwarz'* grundlegender Abhandlung (Nr. 2) die zu den endlichen Gruppen einer Veränderlichen gehörigen Irrationalitäten durch *hypergeometrische Funktionen* ausdrückbar sind⁷⁴), vermittelt also die *Ikosaederirrationalität* auch von dieser Seite einen Zusammenhang zwischen den Wurzeln einer Gleichung 5. Grades und bekannten Reihenentwickelungen der Analysis. Es sind auch die von *Gordan* gegebenen bilinearen Ausdrücke für die *Wurzeln einer Haupt-
 gleichung* (Nr. 12) aus Produkten der *Integrale* λ_1 , λ_2 ; μ_1 , μ_2 zweier hypergeometrischen Differentialgleichungen zusammengesetzt⁷⁵).

72) *Klein*, Math. Ann. 14 (1878), p. 147; 15 (1879), p. 86; Ikos. p. 209, 244; *Kiepert*, Gött. Nachr. (1878, p. 424); Ann. di mat. (2), 9 (1878), p. 119; J. f. Math. 87 (1878), p. 114. Betreffend die Lösung der Gl. 5. Grades durch elliptische Funktionen vgl. *Halphen*, Traité fonct. ell. Par. 3 (1891), p. 1.

73) Vgl. *Klein*, Math. Ann. 14 (1878), p. 157. Auf die betreffenden Fragen nehmen *Klein-Fricke's* „Modulfunktionen“ mehrmals Bezug [insbes. 1 (1890) Abschn. 3, Kap. 4; 2 (1892) Abschn. 4].

74) Vgl. *Klein*, Ikos. (1) 3. Die Oktaederirrationalität und die Gl. 4. Grades behandelt *Puchta*, Wien. Denkschr. 41² (1879), p. 57. Vgl. die grosse Monographie über die durch hypergeometrische Funktionen auflösbaren algebraischen Gleichungen von *L. Lachtine*, Mosk. math. Samml. 16 (1893), p. 597; 17 (1894), p. 1.

75) Als „Differentialresolventen“ bezeichnet man nach *J. Cockle* Differentialgleichungen, die für irgend welche Funktionen der Wurzeln einer vorgelegten

15. Die allgemeinen algebraischen Formenprobleme. Die Lösung durch transcendente Funktionen steht natürlich in keiner Beziehung zur algebraischen Theorie der Gleichungen, welche letztere sich mit ihrer Reduktion auf *möglichst einfache Normalgleichungen* zu beschäftigen hat. Das Problem der algebraischen Gleichungen ist aber von *Klein* verallgemeinert, indem er in allgemeiner Weise das Problem formulierte, *aus den Invarianten einer gegebenen endlichen Gruppe homogener linearer Substitutionen von n Veränderlichen die letzteren zu berechnen*⁷⁶). Die algebraische Behandlung dieser Klasse von Aufgaben und also der algebraischen Lösung der algebraischen Gleichungen wird in der Reduktion der isomorphen Formenprobleme auf ein *Normalproblem* bestehen. Unter den Aufgaben mit isomorphen Gruppen darf man aber die von der *möglichst geringen Dimensionszahl* als die einfachste, also als das *Normalproblem* betrachten⁷⁷). Ein *typisches Beispiel* zu dieser allgemeinen Behandlungsweise liefert die *Zurückführung der Gleichungen 5. Grades auf das binäre Ikosaederproblem*.

Behufs dieser Zurückführung von isomorphen Formenproblemen auf einander wurde von *Klein* eine Methode angegeben, um solche homogene ganze Funktionen $Y_1, Y_2, \dots Y_\mu$ von n Veränderlichen $x_1, x_2, \dots x_n$ zu bilden, welche sich nach einer vorgegebenen Gruppe G_1 homogener linearer Substitutionen transformieren, wenn die x eine isomorphe Gruppe G solcher Substitutionen erfahren. Einen möglichen Einwand gegen diese Methode, dass nämlich die so erhaltenen Grössen vielleicht identisch verschwinden, beseitigte *H. Burkhardt*⁷⁸).

Gleichung gelten. Für die Gl. 5. Grades liefern wohl die betreffenden hypergeometrischen Differentialgleichungen die einfachsten Differentialresolventen. Über Erweiterungen auf algebraische Gleichungen höheren Geschlechts s. *Lachtine*, Mosk. Math. Samml. 19 (1897), p. 211, 393.

76) Zwischen den Invarianten können natürlich fundamentale Identitäten bestehen. Einen Beweis für die *Endlichkeit des Invariantensystems* einer endlichen linearen Substitutionsgruppe gab *D. Hilbert*, Math. Ann. 36 (1890), p. 473. Vgl. *Weber*, Algebra 2 (1896), p. 165 [I B 2, Nr. 6, Anm. 138].

77) Die allgemeine Problemstellung von *Klein* zuerst Math. Ann. 15 (1879), p. 251. Vgl. die orientierende Übersicht von *Klein*, Evanston Coll. (1894), Lect. 9. Man sehe auch *H. Weber*, Algebra (2) 6 (1896) [I B 2, Nr. 11, Anm. 219].

78) *Klein*, Math. Ann. 15 (1879), p. 253; *Burkhardt*, Math. Ann. 41 (1892), p. 309. Wenn die *Galois'sche Gruppe* einer Gleichung (nach etwaiger Adjunktion geeigneter Irrationalitäten) mit einer *Kollineationsgruppe* holoeidisch isomorph ist, muss man also fragen, ob auch eine holoeidisch isomorphe *homogene Substitutionsgruppe* existiert oder nicht. Im ersten Falle lässt sich die Gleichung auf das Formenproblem nach dem im Texte besprochenen Verfahren rational zurückführen; im zweiten Falle muss man dagegen accessorische Irrationali-

Es werden hier $Y_1, Y_2, \dots Y_\mu$ solche numerische Irrationalitäten enthalten, welche in der Gruppe G_1 auftreten⁷⁹⁾.

16. Gleichungen 7. Grades mit einer Gruppe von 168 Substitutionen. Ein weiteres Beispiel von Gleichungen, welche sich auf solche mit nur einem Parameter reduzieren lassen, bieten *Gleichungen 7. und 8. Grades mit einer Gruppe von 168 Substitutionen* dar; doch ist hier die zugehörige Galois'sche Resolvente nicht rational, sondern hat das Geschlecht [III C 2] $p = 3$. *Betti* und *Kronecker*⁸⁰⁾ hatten die Existenz solcher Gleichungen 7. Grades erkannt; übrigens gehört hierher das *Transformationsproblem 7. Ordnung der elliptischen Funktionen*, für welches ja nach einem *Galois*'schen Satze⁸¹⁾ Resolventen 7. Grades existieren. Für das letztere Problem fand aber *Klein*, dass die zur 7. Stufe gehörenden Moduln sich rational durch drei Grössen x, y, z ausdrücken lassen, welche einer Relation $f_4 = x^3y + y^3z + z^3x = 0$ genügen, und zwar trat dabei die G_{168} als eine *Kollineationsgruppe* auf⁸²⁾. Weil letztere Gruppe sich durch eine holoadrisch isomorphe homogene Substitutionsgruppe darstellen lässt, müssen also (nach der vorigen Nr.) alle *Gleichungen mit einer isomorphen Gruppe* sich auf das *ternäre Formenproblem dieser G_{168}* zurückführen lassen. *Klein* führte aber die Reduktion noch einen *Schritt weiter*, indem er nachwies, dass man mittelst einer Hülfs Gleichung 4. Grades einem beliebigen Punkte der Ebene einen *kovarianten Punkt auf $f_4 = 0$* (etwa auf der Polargeraden des Punktes) zuordnen kann. *Die Gleichungen mit einer G_{168} lassen sich also nach Adjunktion der durch die Gleichung 4. Grades eingeführten accessorischen Irrationalität auf das ternäre Formenproblem mit $f_4 = 0$* ⁸³⁾ d. h. das *Transformationsproblem 7. Ordnung* reduzieren; diese Gleichungen sind mithin durch *elliptische Funktionen* lösbar. Die obige Lösungsmethode der Gleichungen 7. Grades mit einer G_{168} wurde von

täten zu Hülfe ziehen, wie bei der Reduktion der allgemeinen Gl. 5. Grades auf das binäre Ikosaederproblem.

79) Dass die Substitutionskoeffizienten endlicher linearer Gruppen sich immer als rationale Funktionen von Einheitswurzeln darstellen lassen, ist neuerdings von *Maschke* bewiesen, Math. Ann. 50 (1898), p. 492.

80) *Kronecker*, Berl. Ber. 1858, p. 287; *Betti*, Ann. mat. fis. 4 (1853), p. 81 [I B 3 c, d, Nr. 24].

81) Über die Beweise dieses Satzes vgl. *Klein*, Math. Ann. 14 (1878), p. 417, sowie I A 6, Nr. 11; I B 3 c, d, Nr. 24.

82) *Klein*, Math. Ann. 14 (1878), p. 428. Vgl. *Klein-Fricke*, Modulfunktionen 1 (1890), p. 692.

83) Für $f_4 = 0$ ist als Resolvente des Formenproblems eine lineare Differentialgleichung 3. Ordnung aufgestellt worden, nämlich von *Halphen*, Math. Ann. 24 (1884), p. 461 und *A. Hurwitz*, Math. Ann. 26 (1885), p. 117.

Klein nur in allgemeinem Umriss skizziert, später von *Gordan* durchgeführt⁸⁴).

Die Gruppe der *Jacobi'schen Gleichungen* 8. Grades ist zwar auch eine G_{168} . Weil aber die entsprechende *homogene quaternäre Substitutionsgruppe* der A mindestens 2.168 Operationen enthält, können die allgemeinen Gleichungen mit einer G_{168} erst nach Adjunktion von accessorischen Irrationalitäten auf Jacobi'sche Gleichungen 8. Grades reduziert werden⁸⁵).

17. Kollineationsgruppen der elliptischen Normalkurven. Eine *einfach unendliche Reihe* von endlichen Gruppen linearer Substitutionen liefern die *Kollineationsgruppen* der von *Klein* eingeführten *elliptischen Normalkurven*. Die homogenen Koordinaten einer Normalkurve in einem R_{n-1} sind n -gliedrigen σ -Produkten proportional mit, bis auf ganzzahlige Vielfache der Perioden ω_1, ω_2 konstanter Residuensumme⁸⁶). Letztere bleibt nun bei den n^2 Transformationen $u' = u + \frac{\lambda\omega_1 + \mu\omega_2}{n}$ invariant, wo u das Integral 1. Gattung bezeichnet. Hierzu kommen noch, weil $\sigma(-u) = -\sigma(u)$, n^2 Operationen $u' = -u + \frac{\lambda\omega_1 + \mu\omega_2}{n}$, welche sich algebraisch in Kollineationen der Normalkurve in sich umsetzen lassen. Für den harmonischen und den äquianharmonischen Fall treten noch weitere Kollineationen hinzu, bei denen $\pm u$ durch $\pm iu$ bez. $\pm \varrho u$, $\pm \varrho^2 u$ ($\varrho = e^{\frac{2\pi i}{3}}$)

84) *Klein*, Erl. Ber. 1878; Math. Ann. 15 (1879), p. 266; *Gordan*, Math. Ann. 17 (1880), p. 219, 359 (das volle Formensystem von f_4 , auch Kontravarianten und Zwischenformen); 19 (1882), p. 529; 20 (1882), p. 487, 515; 25 (1885), p. 459. Vgl. auch *H. Weber*, Algebra (2) 14, 15 (1896), sowie *E. M. Radford*, Quart. J. 30 (1898), p. 263, und I B 2, Nr. 5, Anm. 107. Die beiden Resolventen 7. Grades des ternären Formenproblems finden ihre geometrische Repräsentation durch zwei Systeme von je 7 bei der G_{168} gleichberechtigten Kegelschnitten; diejenige 8. Grades durch 8 gleichberechtigte Wendepunktsdreiecke von $f_4 = 0$. Vgl. etwa *M. Noether*, Math. Ann. 15 (1879), p. 89 [III C 3].

85) Das volle Formensystem der quaternären Substitutionsgruppe $G_{2.168}$ hat *Maschke* gegeben, Chic. Congr. Pap. 1896 (1893), p. 175. Für $f_4 = 0$ erhält man aus den Wurzelausdrücken, welche zu einem bei der ternären G_{168} ausgezeichneten Systeme von Berührungskurven 3. Ordnung gehören, das quaternäre Modulsystem der A; vgl. *Klein*, Math. Ann. 15 (1879), p. 270; *Klein-Fricke*, Modulf. 1, p. 716. Über die Jacobi'schen Gleichungen 8. Grades vgl. *Brioschi*, Lomb. Rend. (2) 1 (1868), p. 68; Math. Ann. 15 (1879), p. 241.

86) Es ist hier ein von *Hermite*, J. f. Math. 32 (1844), p. 277 aufgestellter Satz von Bedeutung, nach welchem jedes n -gliedrige σ -Produkt von gegebener Residuensumme linear und homogen durch n solche linear-unabhängige σ -Produkte darstellbar ist.

ersetzt wird. Die *Kollineationsgruppe* der allgemeinen elliptischen Normalkurve C_n in einem R_{n-1} ist also eine G_{2n^2} , der harmonischen bez. der äquianharmonischen aber eine G_{4n^2} bez. G_{6n^2} .⁸⁷⁾

18. Gruppen aus der elliptischen Transformationstheorie. Jetzt betrachten wir die in der vorigen Nummer eingeführten σ -Produkte X_1, \dots, X_n in ihrer Abhängigkeit von den Perioden ω_1, ω_2 . Hier findet man zuerst, dass die X_α , wenn man ω_1 und ω_2 einer beliebigen homogenen Modulsstitution unterwirft, selbst eine homogene lineare Substitution erleiden. Für ungerade n erweisen sich die X_α als zur n^{ten} Stufe gehörend⁸⁸⁾, d. h. sie bleiben bei allen modulo n mit der Identität kongruenten Modulsstitutionen unverändert. Nun ist die Zahl der modulo n verschiedenen Modulsstitutionen $n^3 \left(1 - \frac{1}{p^2}\right) \left(1 - \frac{1}{q^2}\right) \dots$ (für $n = p^\alpha q^\beta \dots$), welche sich paarweise nur durch das Vorzeichen unterscheiden. Diesen gegenüber stellt sich eine endliche Gruppe von eben so vielen X_α -Substitutionen. Kombinieren wir die letztere Gruppe mit der durch die Substitutionen der u erhaltenen, so ergibt sich im R_{n-1} eine endliche Gruppe von $n^5 \left(1 - \frac{1}{p^2}\right) \left(1 - \frac{1}{q^2}\right) \dots$ Kollineationen. Für $n = 3$ haben wir hier wieder die Hesse'sche Gruppe; wir sehen auch an diesem einfachen Beispiele, wie durch eine ausgezeichnete G_{2n^2} ein System von Normalkurven jede in sich übergeführt wird, und wie durch die Gesamtgruppe je $\frac{1}{2} n^3 \left(1 - \frac{1}{p^2}\right) \left(1 - \frac{1}{q^2}\right) \dots$ Normalkurven mit gleicher absoluter Invariante vertauscht werden.

Bei der Entwicklung der X_α nach u müssen natürlich die zu derselben Potenz gehörigen Koeffizienten die Eigenschaft besitzen, dass sie sich bei der der Modulgruppe nach unendlich hoher Meriedrie [I A 6, Nr. 14] isomorph zugeordneten $G_{n(n^2-1)}$ (n der Kürze wegen als eine ungerade Primzahl angenommen) homogen linear substituieren. Nun wies Klein nach, dass für gerade Potenzen jene Koeffizienten sich aus $\frac{n-1}{2}$, für ungerade aber aus $\frac{n+1}{2}$ linear zusammensetzen. Hieraus erhielt er mit der $G_{n(n^2-1)}$ isomorphe lineare Substitutionsgruppen von $\frac{n-1}{2}$ Moduln z_α und $\frac{n+1}{2}$ Moduln y_α .⁸⁹⁾ Der

87) Vgl. über die elliptischen Normalkurven Klein, Münchn. Ber. 1880, p. 533; Math. Ann. 17 (1880), p. 133; Leipz. Abh. 13 (1885), Nr. 4, p. 335; Klein-Fricke, Modulf. (2) 5, Kap. 1; für $n = 3$ und 5 L. Bianchi, Math. Ann. 17, p. 234.

88) Für gerade n zur $2n^{\text{ten}}$ bez., wenn n durch 4 nicht teilbar ist, $4n^{\text{ten}}$ Stufe. Man sehe Hurwitz, Math. Ann. 27 (1885), p. 198.

89) Math. Ann. 15 (1879), p. 275. Für die Gruppen der u liegen bereits

Isomorphismus ist holoedrisch oder, wenn die betreffenden Moduln von gerader Dimension in den ω_1, ω_2 sind, hemiedrisch; letzteres ist für die z_α , wenn $n \equiv 3 \pmod{4}$, für die y_α , wenn $n \equiv 1 \pmod{4}$, der Fall. Für $n = 5, 7$ bilden die z_α - und die y_α -Substitutionen *unschon bekannte homogene Gruppen*, nämlich die binäre Ikosaedergruppe und die ternäre G_{168} , bez. die ternäre Ikosaedergruppe und die quaternäre $G_{2.168}$.

Für höhere Primzahlen n erhalten wir in gleicher Weise *einfache Gruppen* $G_{\frac{n(n^2-1)}{2}}$, welche den *Hauptkongruenzgruppen* n^{ter} Stufe [II B 6 c] *zugehörig* sind, und dieselben lassen sich durch die z_α - bez. y_α -Substitutionen im $R_{\frac{n-3}{2}}$ bez. $R_{\frac{n-1}{2}}$ als *Kollineationsgruppen* darstellen.

So z. B. liefert der nächst höhere Fall $n = 11$ eine einfache G_{660} , und das zugehörige Transformationsproblem⁹⁰), welches nach einem Galois'schen Satze (Nr. 9) Resolventen 11. Grades besitzt, lässt sich auf ein quinäres Formenproblem zurückführen, ebenso wie die allgemeinen Gleichungen mit einer G_{660} ; doch hat man hier keine Methode, die letzteren mit Hülfe von Gleichungen niederen Grades auf die speziellen Gleichungen des elliptischen Transformationsproblems zu reduzieren, wie für $n = 5$ und $n = 7$.

19. Mit den Gleichungen 6. und 7. Grades isomorphe quaternäre Formenprobleme. Durch *Heranziehung der Liniengeometrie* hat Klein mehrere *quaternäre endliche Substitutionsgruppen* erhalten. Zuerst wurde nachgewiesen, dass nach Einführung der Plücker'schen homogenen Linienkoordinaten [III B 2] x_i ($i = 1, \dots, 6$), zwischen denen eine quadratische Relation $F_2 = 0$ identisch erfüllt ist, *jede lineare Substitution der x_i , welche $F_2 = 0$ in sich überführt*, sich im Punktepaare R_3 *entweder in eine Projektivität oder eine dualistische Transformation* umsetzt, je nachdem, bei Deutung der x_i als Punktekoordinaten im R_5 , die beiden Scharen von $\infty^3 R_2$ auf $F_2 = 0$, welche bez. den Punkten und Ebenen im R_3 entsprechen, jede in sich übergehen oder vertauscht werden⁹¹). Bringt man nun $F_2 = 0$

alle Ansätze in Jacobi's Entwicklungen über die $\frac{n+1}{2}$ Grössen A vor (vgl.

Nr. 10). Über entspr. Gruppen bei geradem n vgl. Hurwitz l. c.

90) Vgl. über das Transformationsproblem 11. Ordnung Klein, Math. Ann. 15 (1879), p. 533. Über dem Inhalte dieser Nummer naheliegenden Fragen sowie auch zahlreiche weitere Litteraturnachweise vgl. Klein-Fricke, Modulfunktionen, besonders (1) 2 und (2) 5.

91) Vgl. Klein, Diss. (Bonn 1868) = Math. Ann. 2, p. 198.

auf die Normalform $\sum_1^6 x_i^2 = 0$, so liefern also die geraden Vertauschungen der x_i unmittelbar Kollineationen⁹²⁾ und auch die ungeraden, wenn man mit der linearen Substitution kombiniert, welche aus dem Übergange zu den mit Bezug auf den linearen Komplex $\sum_1^6 x_i = 0$ konjugierten Geraden resultiert⁹³⁾; auf diese Weise erhielt *Klein* im R_3 eine mit der symmetrischen Gruppe von 6 Dingen holoeidrisch isomorphe Kollineationsgruppe. Dazu kam noch, dass nach Einführung überzähliger Linienkoordinaten x_1, \dots, x_7 , welche jetzt den beiden Identitäten $\sum_1^7 x_i = 0$ und $\sum_1^7 x_i^2 = 0$ genügen, sich aus den geraden Vertauschungen der x_i eine mit der alternierenden Gruppe von 7 Dingen holoeidrisch isomorphe Gruppe von Kollineationen im R_3 ergab⁹³⁾. Jedoch fand *Klein*, dass in beiden Fällen eine entsprechende *homogene* Gruppe mit weniger als der doppelten Zahl von Substitutionen nicht existiert⁹³⁾. Die durch die Existenz dieser Gruppen postulierte *Reduktion der allgemeinen Gleichungen 6. und 7. Grades auf quaternäre Formenprobleme* hat *Klein* mit Hülfe accessorischer Quadratwurzeln in Ansatz gebracht⁹⁴⁾.

20. Reduktion der allgemeinen Gleichungen 6. Grades auf ein ternäres Formenproblem. Nachdem inzwischen in der Ebene eine mit der alternierenden $G_{\frac{6!}{2}}$ isomorphe Kollineationsgruppe G_{360} gefunden war (Nr. 5), konnte das obige quaternäre Formenproblem nicht länger als das mit den Gleichungen 6. Grades isomorphe *Normalproblem* betrachtet werden. Behufs der Reduktion der Gleichung 6. Grades auf das Formenproblem der ternären G_{360} schlägt *Klein* die Methode vor^{94a)}, dass man den Wurzeln x_1, \dots, x_6 zuerst eine Kurve 3. Ordnung — was, weil die ternären Formen 3. Grades sich mit der $G_{\frac{6!}{2}}$ holoeidrisch isomorph substituieren, ohne Aufwand von accessorischen Irrationalitäten gelingt — und dann einen von den 9 Wendepunkten dieser Kurve in kovarianter Weise zuordnen soll. Letzterer Schritt, d. h. die Bestimmung eines Wendepunktes einer C_3 ,

92) Man sehe noch *Klein*, Math. Ann. 4 (1871), p. 355. Vgl. die geometrischen Betrachtungen von *P. Veronese*, Ann. di mat. (2) 11 (1883), p. 284.

93) *Klein*, Math. Ann. 28 (1887), p. 500. Vgl. über die zur $G_{\frac{7!}{2}}$ im R_3

gehörige geometrische Konfiguration *Maschke*, Math. Ann. 36 (1890), p. 190.

94) Ebenda p. 521.

94a) *Form. Line. Pl. (5) 2 (1890)*. Vgl. auch *Math. Ann.* 36 (1890), p. 190.

erfordert bloß die Einführung von quadratischen und kubischen Wurzeln, sodass also die nötigen accessorischen Irrationalitäten auch hier von elementarer Art sind.

21. Satz über die allgemeinen Gleichungen höheren Grades.

Wenn $n > 7$, gilt der allgemeine Satz, dass eine mit der symmetrischen G_{n-1} oder mit der alternierenden $G_{\frac{n-1}{2}}$ holoeidrisch isomorphe Kollinea-

tionsgruppe in einem Raume von weniger als $(n - 2)$ Dimensionen nicht konstruiert werden kann. Im R_{n-2} erhält man aber die Vertauschungsgruppe der x_i unmittelbar als Kollineationsgruppe dargestellt, indem man die x_i als überzählige homogene Koordinaten auf-

fasst, welche der Identität $\sum_1^n x_i = 0$ unterworfen sind. Im Gegensatze

zu den Fällen $n = 5, 6, 7$ bilden also die allgemeinen Gleichungen höheren Grades ihre eigenen Normalprobleme⁹⁵⁾.

22. Quaternäre Gruppe von 11520 Kollineationen. Noch eine weitere quaternäre Gruppe erhielt Klein aus dem *liniengeometrischen Ansatz*⁹⁶⁾, nämlich durch Kombination von Vertauschungen und Vor-

des fraglichen ternären Formenproblems von *Fricke* (Gött. Nachr. 1896, p. 199) für $f_6 = 0$ und von *F. Gerbaldi* (Math. Ann. 50 [1898], p. 473, Pal. Rend. 1900) für den allgemeinen Fall aufgestellt. Für die fragliche Normalgleichung von *Fricke* ist eine einfache Differentialresolvente 3. Grades von *L. Lachin* berechnet worden, Math. Ann. 51 (1898), p. 463. Alle mit symmetrischen und alternierenden Buchstabenvertauschungsgruppen holoeidrisch isomorphen ternären und quaternären Kollineationsgruppen hat *Maschke* gegeben, Math. Ann. 51 (1898), p. 253.

95) Eine nach dieser Richtung gehende Vermutung wurde von Klein [Ev. Coll. (1894), p. 74] ausgesprochen. Der Satz wurde von *Wiman* (Gött. Nachr., Febr. 1897, p. 55) für $n = 8$ bewiesen und später (ebenda, Juli 1897, p. 191) für beliebige höhere n ausgesprochen; den vollständigen Beweis des Satzes gab *W.* erst in Math. Ann. 52 (1899), p. 243 [B 2, Nr. 11, Anm. 219]. Sieht man von der algebraischen Behandlung einer (beliebigen) Gleichung ab, so hat schon *C. Jordan* [Traité des subst. (1870), p. 380] darauf hingewiesen, dass dieselbe auf die spezielle Zerteilung derjenigen hyperelliptischen Funktionen zurückgeführt werden kann, für die bei zu Grunde gelegter zweiblättriger Riemannscher Fläche die Gleichungswurzeln die im Endlichen belegenen Verzweigungspunkte liefern. Dass man aber hieraus ohne Zuhilfenahme höherer algebraischer Identitäten *transcendente Ausdrücke für die Wurzeln* wirklich berechnen kann, hat erst *F. Lindemann* (Gött. Nachr. 1884, p. 245; 1892, p. 292) nachgewiesen; dabei sind die betreffenden Periodizitätsmoduln als Integrale linearer Differentialgleichungen mit rationalen Koeffizienten und mit von Gleichungen niedrigeren Grades abhängenden singulären Punkten nach den Methoden von *Fuchs* aufzufinden. Vgl. hierzu betreffend die Gl. 6. Grades auch *Burkhardt*, Math. Ann. 35 (1889), p. 277.

96) Math. Ann. 2 (1870), p. 366 und 4 (1871), p. 346.

zeichenwechseln der zu der fundamentalen Identität $\sum_1^6 x_i^2 = 0$ gehörigen x_i , indem jede durch eine gerade Anzahl von Elementaroperationen zusammengesetzte Umänderung der x_i im R_3 eine Kollineation bewirkt. Die so erhaltene Gruppe von 16.720 Kollineationen⁹⁷⁾ muss als *ausgezeichnete Untergruppe* eine $G_{16.360}$ besitzen, bei welcher sowohl Vertauschungen als Zeichenwechsel der x_i nur in gerader Zahl auftreten, und in dieser ist wieder eine bloß durch Vorzeichenwechsel erzeugte G_{16} *ausgezeichnet*. Diese G_{16} ist die Kollineationsgruppe von ∞^3 Kummer'schen Flächen, welche Singularitätenflächen von Linienkomplexen $\sum_1^6 k_i x_i^2 = 0$ darstellen. Der Zusammenhang der obigen Kollineationsgruppe G_{11520} mit der Transformation 2. Ordnung der hyperelliptischen Funktionen vom Geschlechte $p = 2$ wurde von Klein hervorgehoben, indem er zeigte, dass die sogenannten Borchardt'schen Moduln sich nach ihr substituieren⁹⁸⁾. Hieran knüpfen weitere Entwicklungen über die G_{11520} von Reichardt, welcher dabei insbesondere den Zusammenhang zwischen den hyperelliptischen Funktionen und der Kummer'schen Fläche in Betracht zog, und Maschke, von dem das vollständige Formensystem aufgestellt wurde; aus der Gruppe ableitbare räumliche Konfigurationen wurden von Hess⁹⁹⁾ untersucht.

Der Isomorphismus der Vertauschungsgruppe von 6 Dingen mit der quaternären Gruppe der Borchardt'schen Thetamoduln führte natürlich zu Versuchen, die Gleichung 6. Grades durch jene Moduln zu lösen. Diese hatten auch Erfolg, indem zuerst Maschke eine Partialresolvente 6. Grades des quaternären Formenproblems der G_{11520} aufstellte¹⁰⁰⁾, und dann Brioschi und wiederum Maschke die allgemeine Gleichung 6. Grades auf jene Resolvente transformierten, wobei die Koeffizienten sich als Invarianten der ursprünglichen Form erwiesen¹⁰¹⁾.

97) Die entsprechende *homogene* Gruppe enthält 64.720 Substitutionen, worüber man die sogleich zu citierenden Arbeiten von Reichardt und Maschke vergleichen möge.

98) Klein, Vorlesungen (Leipzig, Sommer 1885). Die in Betracht zu ziehende Arbeit von C. W. Borchardt, J. f. Math. 83 (1877), p. 234 = Werke, p. 341, handelt eben von der „Darstellung der Kummer'schen Fläche durch die Göpel'sche biquadratische Relation zwischen vier Thetafunktionen“.

99) W. Reichardt, Leipz. Ber. (1885), p. 419; Math. Ann. 28 (1886), p. 84; N. Act. Leop. 50 (1887), p. 375; Maschke, Math. Ann. 30 (1887), p. 496; E. Hess, N. Act. Leop. 55 (1889), p. 97.

100) Ebenda p. 506.

101) Maschke, Brioschi, Rom. Linc. Rend. (4) 4 (1888), p. 181, 301, 485;

Diejenigen *Gleichungen 16. Grades*, von denen die Bestimmung der 16 *Knotenpunkte einer Kummer'schen Fläche* abhängt, haben eine mit der G_{11520} holoeidrisch isomorphe Gruppe, einfacher sind dagegen die Gleichungen, welche die 16 *Geraden einer Fläche 4. Ordnung mit doppeltem Kegelschnitte* bestimmen, indem ihre Gruppe sich mit einer Untergruppe $G_{16.120}$ der $G_{16.720}$ holoeidrisch isomorph erweist¹⁰²).

23. Quaternäre und quinäre Gruppen aus der Dreiteilung der hyperelliptischen Funktionen. Aus der elliptischen Transformationstheorie (Nr. 18) kennen wir Systeme von je n Grössen X_α und von daraus ableitbaren $\frac{n+1}{2} y_\alpha$ und $\frac{n-1}{2} z_\alpha$. Nun hat *Klein* darauf hingewiesen, wie die entsprechenden Überlegungen im *hyperelliptischen Falle* ($p = 2$) zu je n^2 ganz analogen Grössen $X_{\alpha\beta}$ (wie die Borchardt'schen Moduln für $n = 2$) führen¹⁰³), aus denen man dann, wenn n ungerade, Systeme von je $\frac{n^2+1}{2}$ Grössen $Y_{\alpha\beta}$, bez. $\frac{n^2-1}{2}$ Grössen $Z_{\alpha\beta}$ herleiten kann¹⁰⁴).

Die linearen Substitutionsgruppen, welche die $Y_{\alpha\beta}$ und die $Z_{\alpha\beta}$ bei linearer Transformation der Perioden erleiden, sind nur für $n = 3$ näher untersucht worden. In diesem Falle besitzt das Problem ein doppeltes Interesse, weil nach *C. Jordan*¹⁰⁵) die Gruppe der *Gleichung 27. Grades*, von welcher die *Geraden auf einer allgemeinen F_3 [III C 6]* abhängen, eine ausgezeichnete (und zwar einfache) Untergruppe vom Index 2 enthält, welche aus 25920 Substitutionen besteht und mit der Gruppe der *Dreiteilung der hyperelliptischen Funktionen isomorph*

Brioschi, Act. math. 12 (1888), p. 83; Ann. Éc. norm. (3) 12 (1895), p. 343 [I B 2, Nr. 10, Anm. 205]. Um die Aufstellung einer linearen Differentialgleichung 4. Ordnung, deren Integrale mit den Borchardt'schen Moduln zusammenfallen, als Resolvente der Gl. 6. Grades handelt es sich bei *F. N. Cole*, Amer. J. of math. 8 (1886), p. 265.

102) Die Gruppen dieser beiden Klassen von Gleichungen bestimmte *C. Jordan*, Traité des subst. 1870, p. 309, 313 [I B 3 c, d, Nr. 29].

103) Die von *Klein* in seinen Vorlesungen gegebenen Andeutungen über die $X_{\alpha\beta}$ wurden zunächst von *A. Witting* ausgeführt, Math. Ann. 29 (1886), p. 157; Diss. (Göttingen 1887); spätere Vereinfachungen und Zusätze stammen von *Burkhardt*, Math. Ann. 38 (1891), p. 163.

104) Die Moduln Y und Z treten auch in den citierten Arbeiten von *Witting* auf. Doch finden sich mit den Y äquivalente Funktionen schon bei der Behandlung der hyperelliptischen Multiplikatorgleichungen (genau wie bei *Jacobi* im elliptischen Falle [Nr. 10]) von *E. Wiltheiss*, J. f. Math. 96 (1883), p. 17.

105) Vgl. (auch wegen der Untergruppen) *C. Jordan*, J. de math. 4 (1869), p. 147; Traité des subst. p. 316, 365. Vgl. noch *E. Pascal*, Ann. di mat. 20 (1892), p. 163, 269; 21 (1893), p. 85 [I B 3 c, d, Nr. 29; III C 6].

ist. *C. Jordan* hat nun auch bereits 5 wichtige Arten von Untergruppen jener G_{25920} mit den bez. Indices 27, 36, 40, 40, 45 bestimmt, welche in den Entwicklungen der folgenden Verfasser die Hauptrolle spielen, und bewiesen, dass die G_{25920} keine Untergruppen von niedrigerem Index als 27 enthalten kann. Wie man jene Gleichung 27. Grades auf das quaternäre Formenproblem der hyperelliptischen Moduln $Z_{\alpha\beta}$ zurückführen kann, hat *Klein* skizziert¹⁰⁶). Die quaternäre Gruppe der Z , welche aus 2.25920 homogenen Substitutionen besteht und mit der zugehörigen Kollineationsgruppe G_{25920} hemiedrisch isomorph ist, wurde zuerst von *Witting* behandelt. Das vollständige aus 5 Formen bestehende System von Invarianten wurde sodann von *Maschke* aufgestellt. Endlich vervollständigte *H. Burkhardt* die früheren Untersuchungen durch Einführung von *Linienkoordinaten*¹⁰⁷); die senäre Gruppe von 25920 Substitutionen, welche sich dadurch neben die Gruppe der Z stellte, liess unmittelbar die Beziehung zwischen den Gleichungen 27. Grades mit einer G_{25920} und dem Probleme der Z erkennen.

Burkhardt behandelte auch die quinäre Gruppe der Y von 25920 homogenen Substitutionen und stellte dabei ihr vollständiges System von 6 Invarianten auf¹⁰⁸). In geometrischer Hinsicht traten am meisten zwei Systeme von 40 bez. 45 Haupträumen hervor, ebenso wie bei der Gruppe der Z eine Konfiguration von 40 Ebenen, welche den anderen Untergruppen vom Index 40 zugeordnet sind.

24. Gruppen von eindeutigen Transformationen einer algebraischen Kurve in sich. Nach den Untersuchungen von *Schwarz* u. a. [III C 9] ist es bekannt, dass ein algebraisches Gebilde vom Geschlechte $p > 1$ nur eine endliche Zahl von eindeutigen Transformationen in sich zulassen kann. Allgemeine Untersuchungen über solche Gebilde mit eindeutigen Transformationen in sich hat nun insbesondere *Hurwitz* unternommen¹⁰⁹). Die zugehörigen endlichen Transformationsgruppen sind im hyperelliptischen Falle auf die endlichen binären Gruppen

106) J. d. math. (4) 4 (1887), p. 169.

107) *Witting*, Diss.; *G. Maschke*, Gött. Nachr. 1888, p. 78; Math. Ann. 33 (1889), p. 317; *Burkhardt*, Math. Ann. 41 (1892), p. 317. Vgl. über die quaternäre Gruppe der Z auch *G. Morrice*, Lond. M. S. Proc. 21 (1890), p. 58; 23 (1892), p. 213.

108) Gött. Nachr. 1890, p. 376; Math. Ann. 33 (1891), p. 185.

109) Man sehe über periodische Transformationen Gött. Nachr. 1887, p. 85 und Math. Ann. 32 (1888), p. 290; über allgemeine Transformationsgruppen Math. Ann. 41 (1892), p. 403.

hemiedrisch isomorph bezogen, indem die zweiwertige Hauptfunktion sich nach einer solchen substituieren muss. Für $p = 2$ hat O. Bolza die in Rede stehenden Transformationsgruppen bestimmt¹¹⁰⁾. Im nicht-hyperelliptischen Falle kann man die durch die Transformationen gebildete Gruppe in eine *Kollineationsgruppe* im R_{p-1} überführen, indem man die p homogenen Koordinaten den Differentialquotienten der Integrale erster Gattung proportional setzt. Für $p = 3$ und $p = 4$ hat Wiman die hier besprochenen Kollineationsgruppen hergeleitet¹¹¹⁾; auch sind von ihm verschiedene Resultate für $p = 5, 6$ gegeben.

25. Endliche Gruppen von birationalen Transformationen.

Man kann die bisherige Fragestellung erweitern, indem man ganz allgemein nach den *endlichen Gruppen von birationalen Transformationen* fragt. Hier hat S. Kantor mit besonderem Erfolge eingesetzt. Zuerst handelte es sich bei ihm um die Bestimmung der *periodischen Transformationen in der Ebene*. Diese Frage erledigte er nach zwei Methoden: einmal so, dass er die geometrische Konstruktion der Gruppen durch eine rein *arithmetische* Untersuchung über die möglichen Verkettungen der Fundamentalpunkte bei den Transformationen vorbereitete¹¹²⁾; seine zweite *rein geometrische* Lösung¹¹³⁾ ging von einem invarianten linearen Systeme von rationalen oder elliptischen Kurven aus, dessen Existenz er durch den Übergang zu den successiven Systemen von adjungierten Kurven einer ursprünglichen invarianten Kurve nachgewiesen hatte. Weiter suchte Kantor¹¹⁴⁾ unter wechselnder Anwendung seiner verschiedenen Methoden *alle endlichen Gruppen von birationalen Transformationen in der Ebene überhaupt* zu bestimmen. Seine Lösungen hier waren aber in mancher Hinsicht unrichtig; die nötigen Berichtigungen wurden von Wiman gegeben¹¹⁵⁾. Die *typischen Hauptklassen* von endlichen birationalen Transformationsgruppen in der Ebene sind nach Kantor die folgenden¹¹⁶⁾:

1) Kollineationsgruppen;

110) Amer. J. of math. 10 (1887), p. 47; Math. Ann. 30 (1887), p. 546 [I B 2, Nr. 4, Anm. 85].

111) Stockh. Bih. 21¹, Nr. 1, 3 (1895); wegen $p = 3$ vgl. auch W. Dyck, Math. Ann. 17 (1880), p. 474, 510.

112) „Premiers fondements pour une théorie des transformations périodiques univoques“ (Preisschrift Neapel 1891); vgl. J. f. Math. 111 (1894), p. 50.

113) Acta math. 19 (1895), p. 115. Dort findet sich (p. 167) die erste völlig korrekte Aufzählung der periodischen Typen.

114) „Théorie d. endl. Gruppen von birationalen Transformationen in der Ebene“ (Berlin 1895).

115) Math. Ann. 48 (1896), p. 195.

116) l. c. p. 43.

2) Gruppen von „orthanallagmatischen“ Transformationen¹¹⁷⁾, welche einen Geradenbüschel invariant lassen;

3) Gruppen, welche ein System von Kegelschnitten durch zwei feste Punkte invariant lassen und den Gruppen der Kollineationen einer F_2 in sich entsprechen;

4—8) Gruppen, welche ein System von C_3 mit 3 bis 7 festen Punkten invariant lassen;

9) Gruppen mit invariantem C_3 -Büschel und überdies invariantem Systeme von C_6 mit Doppelpunkten in den 8 Basispunkten.

In den Klassen 3 bis 5 kommen höchstens *quadratische* und in der Klasse 6 *kubische Transformationen* vor; solche Gruppen sind von *L. Autonne*¹¹⁸⁾ vielfach behandelt. Die Klasse 7 erhält man aus den *Kollineationsgruppen einer F_3 in sich* durch die Abbildung dieser Fläche auf die Ebene. Bei den Klassen 8 und 9 kann man die Ebene als das Bild einer *doppelten Ebene mit einer C_4* , bez. eines *doppelten Kegels 2. Grades mit einer C_6 als Übergangskurve*¹¹⁹⁾ betrachten, sodass man in beiden Fällen durch Kombination der Vertauschung der beiden Blätter mit der Gruppe der Kollineationen der Übergangskurve in sich die in der einfachen Ebene zu bestimmenden Gruppen herleiten kann.

*Kantor*¹²⁰⁾ hat auch die endlichen Gruppen von *birationalen Transformationen im R_3* , bei denen die den Ebenen entsprechenden Flächen keine doppelten oder mehrfachen Kurven enthalten, untersucht und ihre Typen aufgezählt.

26. Erweiterung auf unendliche diskontinuierliche Gruppen.

Die hier in Betracht gezogene Theorie der *endlichen* Gruppen findet in der Theorie der *unendlichen diskontinuierlichen* Gruppen ihre naturgemässe Fortsetzung, deren Behandlung insbesondere in II B 6 c der vorliegenden Encyclopädie unternommen wird.

117) Nach *Wiman* (l. c. p. 200, 207) existiert hier in den Fällen, welche nicht durch die Klassen 1 und 3 geliefert werden, immer eine invariante hyperelliptische Kurve.

118) Par. C. R. 97, 98, 101 (1883—85); J. d. math. (4) 1, p. 431; 2, p. 49; 3, p. 63; 4 p. 177, 407 (1885—88).

119) Wegen dieser Abbildungen einer einfachen Ebene auf eine Doppelsebene vgl. man etwa *Noether*, Erl. Ber. 10 (1878), p. 81; bez. der Litteratur s. noch Fortschr. d. Math. 9 (1877), p. 581.

120) Acta math. 21 (1897), p. 1; Amer. J. of math. 19 (1897), p. 1, 382.

